

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

*Електроніки*

(повна назва інституту/факультету)

*Кафедра мікроелектроніки*

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

ВО Завідувача кафедри

Орлов А.Т.

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності

153 Мікро- та наносистемна техніка

(код і назва)

на тему: “Кремнієві фотоелектричні перетворювачі для сонячних батарей космічних апаратів”

Виконала: студентка 6 курсу, групи ДП-92мп

(шифр групи)

Бондарь Поліна Степанівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., д.т.н, проф Якименко Ю.І.

Консультант доц., к.т.н, Іващук А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій Свєчніков.

(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В.

(підпис)

Рецензент Тимофєєв В.І., зав. каф. ЕІ, професор, д.т.н

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань. Студент

(підпис)

Київ – 2020 року

2

1. Конструкції кремнієвих ФЕП. 2. Фактори радіаційного впливу на різних орбітах в космосі. 3. Фотовольтаїчні характеристики ФЕП. 4. Топологія поверхні зразків з різною технологією вакуумного нанесення.

6. Консультанти розділів проекту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2-7	Іващук А.В.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план виконання

№	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
	Літературний огляд конструкцій і технологій кремнієвих ФЕП підвищеної радіаційної стійкості та конструкції сонячних батарей для космічних апаратів	09.09.2020	
	Аналіз впливу конструкції ФЕП на його характеристики	16.09.2020	
	Аналіз впливу технологій на параметри ФЕП	23.09.2020	
	Виготовлення ФЕП	02.10.2020	
	Дослідження фотовольтаїчних характеристик ФЕП	08.10.2020	
	Підготовка звіту з практики	15.10.2020	
	Обговорення результатів досліджень та написання магістерської дисертації.	01.12.2020	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Бондарь П.С.  
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Якименко Ю.І.  
(ініціали, прізвище)

Консультант проекту

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Іващук А.В.  
(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської дисертації містить 90 сторінки, 29 рисунків, 29 таблиць, 32 бібліографічні найменування.

В наш час, живлення за допомогою альтернативної енергії викликає інтерес, а особливо це є актуальним для космічної промисловаості та живлення КА де необхідні високоефективні ФЕП.

В даній магістерській дисертації було розглянуто СБ на кремнієвих елементах з оптимізованою контактною системою, параметри таких ФЕП та стандарти. Розроблено технологічний маршрут напилення контактів та досліджено принцип дії ФЕП.

Досліджувались характеристики багатошарових систем контактів ФЕП та фотовольтаїчні характеристики ФЕП, їх конструкція, та вплив їх оптимізації на досліджені характеристики.

Метою дослідження є розробка ФЕП на кремнії, високої радіаційної стійкості з оптимізованою технологією виготовлення системи контактів, та ККД вище 18%.

Об'єктом дослідження роботи є виготовлені зразки кремнієвих ФЕП з радіаційною стійкістю, та оптимізованої системи контактів виготовлених за розробленим технологічним маршрутом, їх електричні, структурні та фотоелектричні характеристики.

Предметом дослідження є фотоелектричні параметри, та виготовлених кремнієвих ФЕП з системою контактів Ti/Mo/Ag.

Перший розділ роботи містить загальну інформацію про сончну енергію та фізику основи її перетворення.

Другий розділ містить інформацію щодо технологій виготовлення ФЕП з кремнію та процесів дифузії.

У третьому розділі розглянуто вплив середовища на фотоелектричні перетворювачі.

У четвертому розділі представлено розроблений технологічний маршрут виготовлення багат шарової системи контактів, дослідження характеристик ФЕП з виготовленими системами контактів контактів вакуумними методами.

У п'ятому розділі представлені вольт-амперні характеристики та характеристики досліджуваних ФЕП.

*Ключові слова:* р-n-перехід, спектральна чутливість, кремнієвий фотоперетворювач космічного призначення, коефіцієнт корисної дії, радіаційна стійкість, система контактів титан-срібло, система контактів титан-молібден-срібло, технологічний маршрут напilenня Мо

## ABSTRACT

The explanatory note to the master's dissertation contains 90 pages, 29 figures, 29 tables, 32 bibliographic names.

Nowadays, power supply with the help of alternative energy is of interest, and this is especially relevant for the space industry and power supply of spacecraft where high-efficiency power plants are needed.

In this master's dissertation, the SC on silicon elements with an optimized contact system, the parameters of such PEC and standards were considered. The technological route of spraying of contacts is developed and the principle of action of FEP is investigated.

The characteristics of multilayer PEC contact systems and photovoltaic characteristics of PEC, their design, and the influence of their optimization on the studied characteristics were studied.

The aim of the study is to develop PEC on silicon, high radiation resistance with optimized technology of manufacturing the contact system, and efficiency above 18%.

The object of research is the manufactured samples of silicon PEC with radiation resistance, and the optimized system of contacts made according to the developed technological route, their electrical, structural and photoelectric characteristics.

The subject of the study are photoelectric parameters and manufactured silicon PV with a system of contacts Ti / Mo / Ag.

The first section of the work contains general information about solar energy and the physical basis of its transformation.

The second section contains information on technologies for the production of FEP from silicon and diffusion processes.

The third section considers the influence of the medium on photovoltaic converters.

In the fourth section the developed technological route of manufacturing of multilayer system of contacts, research of characteristics of PEC with the made systems of contacts of contacts by vacuum methods is presented.

The fifth section presents the volt-ampere characteristics and characteristics of the studied PEC.

Keywords: p-n junction, spectral sensitivity, silicon photoconverter for space use, efficiency, radiation resistance, titanium-silver contact system, titanium-molybdenum-silver contact system, technological route of Mo spraying

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1. СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ ТА ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕТВОРЕННЯ.....	12
1.1. Характеристики інтенсивності та спектрального складу випромінювання.....	12
1.2. Принцип роботи кремнієвих ФЕП, ефективність перетворення та основні фізико-топологічні параметри.....	14
1.3. Послідовний та шунтуючий опір, їх вплив на вихідну потужність сонячних елементів.....	20
2. ВИГОТОВЛЕННЯ ФЕП ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ КОНСТРУКЦІЙ.....	23
2.1. Конструкція фотоелектричного перетворювача та технологія їх виготовлення.....	23
2.2. Дифузія у твердому тілі.....	25
2.3. Дифузія фосфору при створенні <i>p-n</i> переходу для ФЕП.....	34
2.4. Текстурований кремнієвий елемент.....	37
2.5. Вплив конструктивно-технологічних параметрів кремнієвих ФЕП на параметри ННЗ.....	38
3. СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ У КОСМОСІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ.....	42
3.1. Основні типи ФЕП космічного призначення.....	42
3.2. Середа експлуатації ФЕП.....	44
3.3. Вплив космічного середовища на сонячні елементи.....	46



4. КОНТАКТНІ СИСТЕМИ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРОЮВАЧІВ.....	53
4.1. Технологія виготовлення контактів.....	53
4.2. Технологічний маршрут виготовлення контактної системи Ti/Mo/Ag.....	55
4.3. Дослідження виготовлених контактів Ti/Mo/Ag.....	59
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕП .....	69
5.1. Дослідження фотовольтаїчних характеристик ФЕП.....	69
6. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	75
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ.....	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ККД – коефіцієнт корисної дії.

СЕ – сонячний елемент.

ЗЗ – заборонена зона.

АМ – Air Mass.

ФЕП – фотоелектричний перетворювач.

КЗ – коротке замикання.

ВАХ – вольт-амперна характеристика.

ННЗ – неосновні носії зарядів.

ГЛОНАСС – глобальна навігаційна супутникова система.

МКС – міжнародна космічна станція.

УФ – ультрафіолет.

ВІМС – вторинно іонна мас-спектрометрія.

МН – магнетронне напilenня.

ЕПН – електронно променеве напilenня.

## ВСТУП

Перспективами та основними цілями для сучасної фотоелектричної енергетики є ефективність та якість перетворення сонячної енергії в електричну, а значить необхідне зменшення втрат, та зниження собівартості виготовленого перетворювача.

Сонячні елементи є невід’ємним джерелом живлення для космічних апаратів. Для таких сонячних елементів необхідна оптимізація в конструкції та технології виготовлення, щоб отримати СЕ з високими техніко-економічними характеристиками.

Необхідно врахувати середовище, та його вплив на фотоелектричні перетворювачі, щоб якісно визначити необхідні етапи оптимізації та зменшення рівня деградації за рахунок таких чинників, як перегрів, потоки корпускулярного випромінювання та вплив часток високої енергії.

Одним із способів зменшення електричних втрат – є зменшення послідовного опору контактів.

В данній магістерській роботі було проведено дослідження виготовлених зразків кремнієвих фотоперетворювачів з радіаційною стійкістю, та оптимізованою системою контактів, що були виготовлені за розробленим технологічним маршрутом, їх електричні, структурні та фотоелектричні характеристики.

## 1. СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ ТА ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕТВОРЕННЯ

### 1.1. Характеристики інтенсивності та спектрального складу випромінювання

Сонце являє собою джерело енергії. Джерелом енергії саме сонячного випромінювання слугує термоядерна реакція – кожену секунду на Сонці відбувається утворення гелію із водороду ( $\sim 6 \cdot 10^{11}$  кг). Основна частина енергії випромінюється у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні 0.2-3 мкм [2]

Випромінювання сонця характеризуються двома основними параметрами:

спектральний склад світла;

інтенсивність.

Спектральний склад світла можна характеризувати створеним поняттям «повітряна маса» - показник впливу спричиненого атмосферою на інтенсивність сонячного випромінювання, котре доходить до земної поверхні, в оригіналі «Air Mass», що має розподіл на декілька значень відповідно до типу спектру:

Спектральний склад AM2 – випромінювання у випадку коли кут між Сонцем та проходження його через атмосферу складає  $60^\circ$

Спектральний склад AM1,5 – випромінювання наземного простору, коли воно проходить під кутом  $45^\circ$  через атмосферу, середня інтенсивність випромінювання.

Спектральний склад AM1 – випромінювання на поверхні Земної кулі, у випадку коли воно знаходиться над обраною точкою спостереження.

Спектральний склад AM0 – випромінювання за межами Земної кулі та її атмосфери, при нульовій повітряній масі.

На рис.1.1. показано спектральний розподіл інтенсивності сонячного випромінювання в різних умовах.

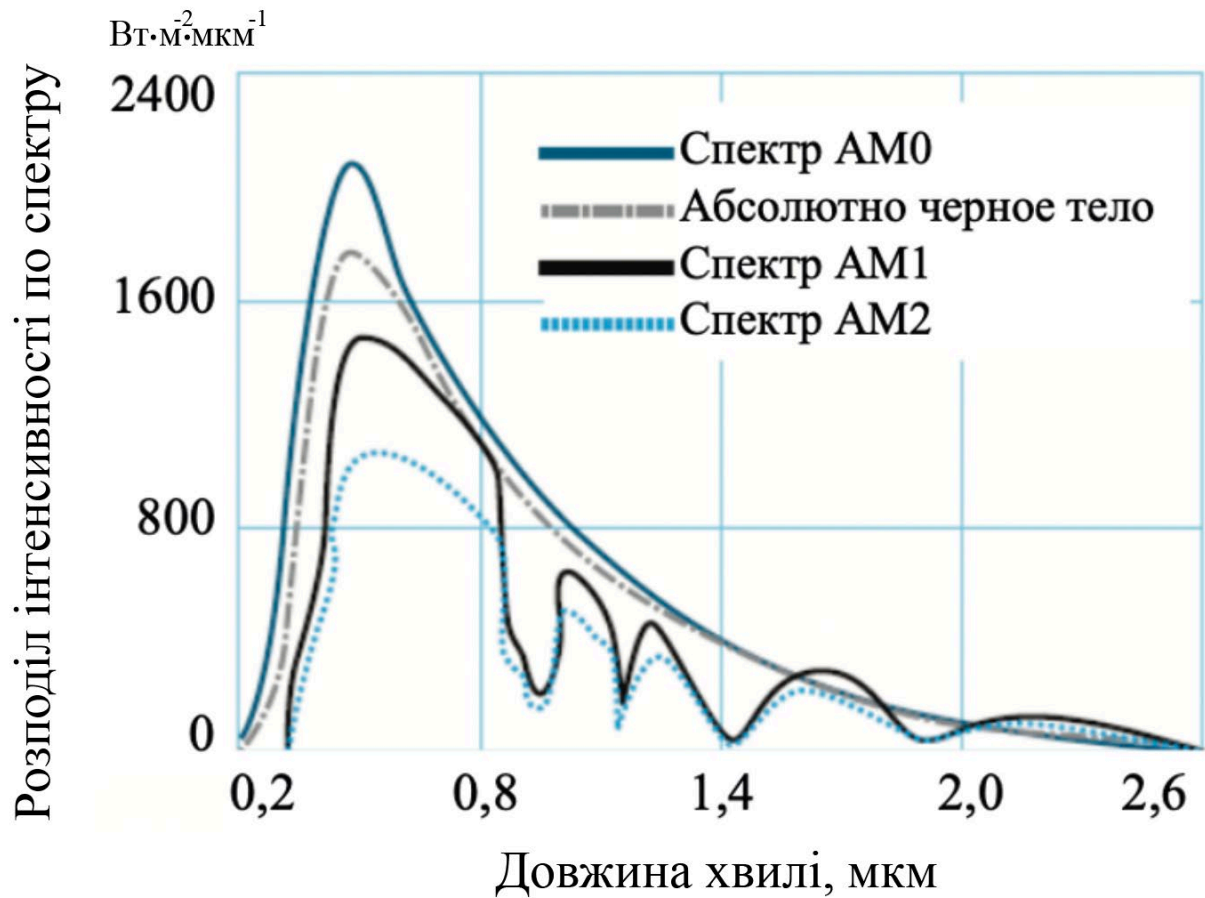


Рисунок 1.1 – Розподіл інтенсивності сонячного випромінювання за різних умов

Інтенсивність сонячного випромінювання являє собою потужність енергії Сонця, яка потрапляє на поверхню поглинаючи промені. Сонячна стала – середнє значення потужності сонячного випромінювання, та дорівнює  $1373 \text{ Вт/м}^2$

## 1.2. Принцип роботи кремнієвих ФЕП, ефективність перетворення та основні фізико-топологічні параметри

Перелік основних фізико-технологічних чинників, що впливають на фотоелектричні характеристики ФЕП:

- В при поверхневій області пластини кремнію відбувається зсув, через процес легування, електро-хімічного потенціалу.
- Вплив глибини залягання р-n переходу в емітері, концентрація легуючої домішки та сама легуюча домішка в області фронтальної сторони
- В області фронтальної та тильної сторін пластини вплив швидкості рекомбінації на площині ННЗ – неосновних носіїв заряду.
- В області базового шару - дифузійних довжини неосновних носіїв заряду.
- Характерна особливість базового шару, а саме – товщина пластини.

Еталонним приладом для сонячних батарей є кремнієвий фотоелектричний перетворювач, також називають – сонячний елемент. Вже протягом тридцяти років не змінюється істотно конструкція фотоелектричного перетворювача. Монокристалічний СЕ – це елемент що включає поглинач, який є цільним кристалом з напівпровідникової речовини, такі перетворювачі на 75% виготовляються аналогічно вже відомій конструкції та 99% з мультикристаліного кремнію.

Фотоелектричний перетворювач – це прилад для перетворення сонячної енергії фотонів в електричну енергію. Конструкція типового сонячного елементу представлена на рис.1.2.

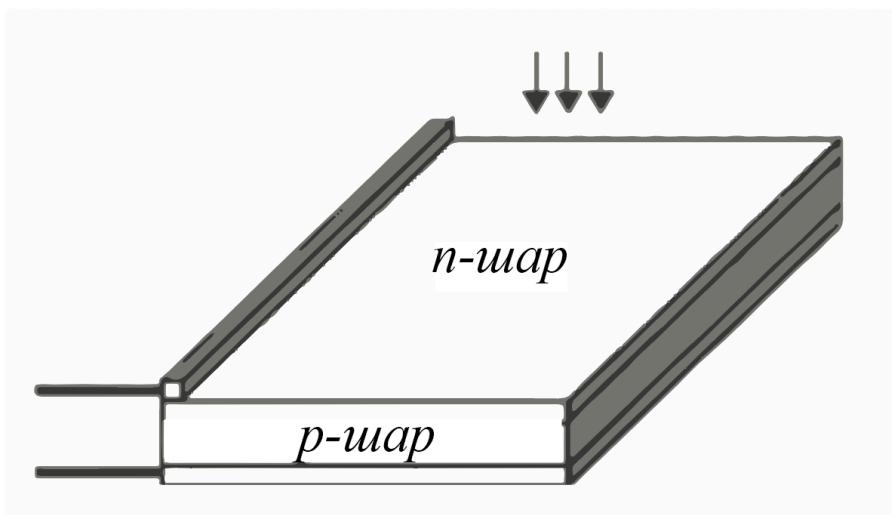


Рисунок 1.2 – Конструкція СЕ

Найбільш ефективним приладом для перетворення енергії Сонця в електричну є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі, оскільки це є прямим одноступеневим переходом енергії. Основні галузі застосування ФЕП – сонячні електростанції та системи енергозабезпечення космічних апаратів. Тому для даних приладів дуже ваговою характеристикою є термін їх експлуатації, особливо у випадку їх експлуатації для живлення космічного апарату. В наш час сонячні батареї – це один з надійніших та відпрацьованих варіантів забезпечення живлення космічного апарату енергією.

Сонячний елемент складається з р-n переходу, що сформовано на невеликій глибині, тилового суцільного металевого контакту. Під час освітлення сонячного елемента фотони, що поглинаються, генерують електрон-діркові пари, що є нерівноважними. У р-шарі генеруються електрони та дірки, електрони переміщуються у р-n перехід, а потім мігрують в шар n (рис. 1.3. а). Дірки частково мігрують в шар р після того, як згенерувались. Результатом таких переміщень стає те, що n та р шари набувають негативного та позитивного заряду, відповідно (рис

1.2.б). Поява фотоЕРС обумовлена тим, що відбувається спад різниці потенціалів між р-шаром та n-шаром.

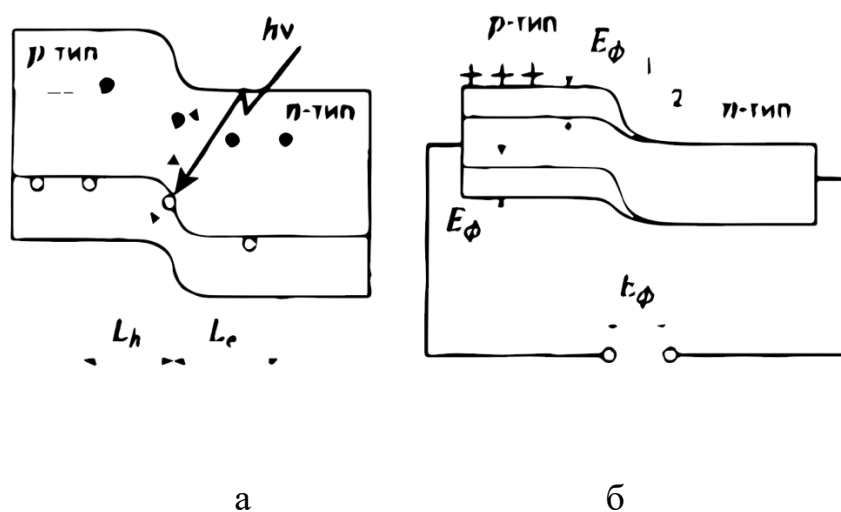


Рисунок 1.3 – Зонна модель розімкнутого р-п переходу: а) в початковій момент освітлення; б) зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото-ЕРС

Наступні фізичні явища лежать в основі перетворення та функціонування ФЕП сонячної енергії:

- Поглинання квантів електромагнітного випромінювання в напівпровідниковому матеріалі з утворенням вільних електронів та дірок;
- Розподіл генерованих світлом електронів і дірок за допомогою внутрішніх електричних полів напівпровідникового фотоперетворювача та їх вивід у зовнішнє електричне коло через електроди.



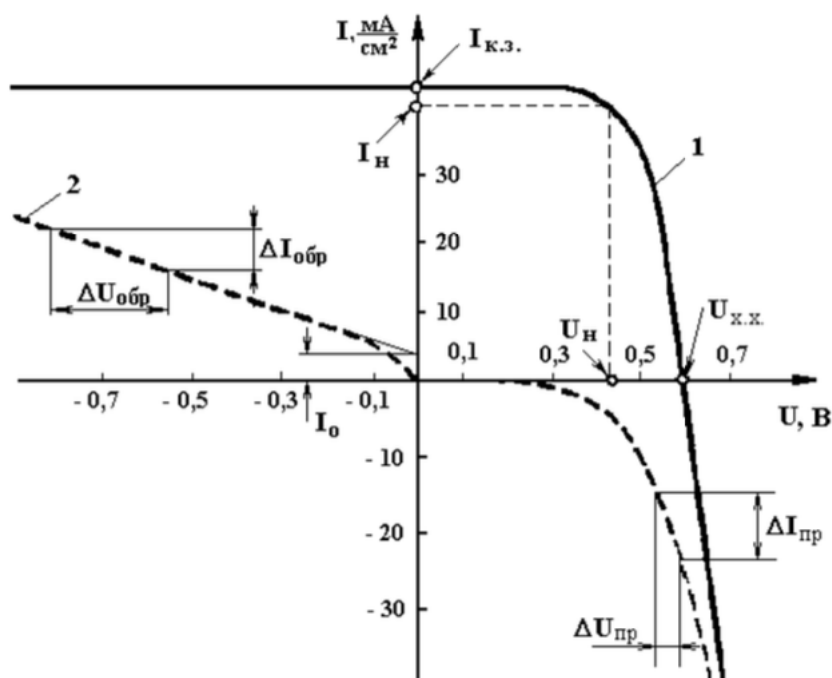


Рисунок 1.4 – ВАХ фотоелектричного перетворювача на основі кристалічного кремнію при умовах освітлення АМ0, де 1 -суцільна лінія темнова (виміряна в відсутності освітлення вольт – амперна характеристика цього ж приладу, 2-пунктирна лінія. Символами  $U_H$  і  $I_H$  позначені значення напруги і щільності струму.

Типова ВАХ кремнієвого фотоелектричного перетворювача в умовах освітлення АМ0 зображена на рис.1.3. Коефіцієнт заповнення ВАХ є важливим параметром фотоелектричного перетворювача. Сучасні кремнієві сонячні елементи характеризуються цим параметром у межах 0,75 – 0,80. Та не менш вагомий вплив на коефіцієнт ВАХ заповнення спричиняють такі параметри, як шунтуючий та послідовний опори.

ФЕП з монокристаліного кремнію характеризуються найвищою питомою енергетичною характеристикою. Саме за рахунок росту вихідної потужності та чутливості з обох сторін, такі ФЕП експлуатуються для космічних апаратів, що літають низько.

У випадку росту температури та значному рості концентрації сонячного опромінення на фотоелектричний перетворювач відбувається спад коефіцієнта

корисної дії. [8]. Кількість випромінювання, що потрапляє на поверхню фотоелектричного перетворювача значно впливають на характеристики СЕ.

Таблиця 1.1 - Значення ККД та область використання існуючих кремнієвих ФЕП:

ФЕП	ККД	Область експлуатації
Монокристалічні ФЕП	17-19% ККД	1) Сонячні енергосистеми професійного використання 2) Сонячні електростанції 3) Забезпечення живленням космічні апарати 4) Високоякісні сонячні системи
Полікристалічний ФЕП	ККД 15-17%	1) Якісні сонячні енергосистеми 2) Електростанції невеликих розмірів 3) Для приватних будинків 4) Використання для живлення побутових пристроїв
Тонкоплівкові ФЕП з аморфного кремнію	ККД 7-11%	1) Не великої вартості приватні енергосистеми 2) Побутове освітлення для світлодіодних систем 3) Використання для живлення невеликих побутових пристроїв

ККД – це найважливіша і найосновніша характеристика фотоелектричного перетворювача. У теорії максимально можливе значення ККД визначається з рахуванням втрат, що є основними, враховуючи закон фотоелектричного ефекту та фотонів, що є невикористаними х меншою енергією ніж ширина забороненої зони, проілюстровано на рис.1.5. Приведена залежність базується на розрахунках [14].

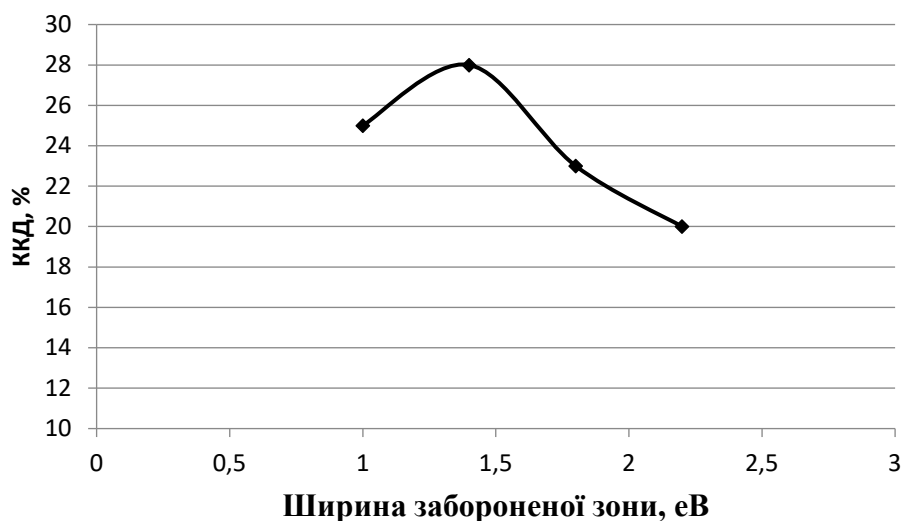


Рисунок 1.5 – Залежність ККД від ширини ЗЗ [14]

Проведений аналіз залежності, показав, що використання AsGa, як базовий матеріал з шириною забороненої зони - 1,4eV, можливо отримати максимальне значення ККД.

Основною вимогою для розробки ФЕП сонячної батареї космічного апарату є зменшення собівартості, тому доцільно використання кремнію, як базовий матеріал, ширина ЗЗ складає 1,12 eV, а значення ККД максимально можливого – 27%.

Параметри, що є основними для кремнію%

- $I_{K3}$  - щільність струму КЗ складає 44 мА/см<sup>2</sup>;
- $V_{PK}$  - напруга розімкнутого кола складає 770 мВ;
- FF - коефіцієнт заповнення ВАХ складає 0,884.

Дані параметри дозволяють визначити ККД для фотоелектричного перетворювача, та зафіксувати від чого залежить зменшення значення ККД.

На поверхню (площину) напівпровідника потрапляє сонячна енергія, її можна розподілити на наступні групи[14]:

1. Електрична енергія що була отримана з перетворення сонячної.

Усереднене ККД фотоелектричних перетворювачів становить від 17,5 до 18,5% (2018 р.) (з площею не більше 100 см<sup>2</sup>).

2. Втрати при відбитті, викликані неможливістю створення оптичної системи з максимальним поглинанням світла в широкому діапазоні чутливості фотоелектричного перетворювача. Можливе уникнення втрат, за рахунок антиблікових покриттів, на 2-5%.
3. Втрати при відбитті від тильної (фронтальної) контактної системи. Фронтальна поверхня ФЕП на 4-7% складається із контактної сітки, саме це є визначним чинником рівня втрат.
4. 1% нефотоактивного поглинання.
5. Фотонна енергія, що менша за заборонену зону покриття, що є антибліковим – 19%.
6. Фотонна енергія, що більша за заборонену зону – 30%
7. 4 – 5% - збір фотогенерованого заряду.
8. 20% - рекомбінаційні явища. Є залежними від діодної структури ФЕП.
9. 5% - втрати під час прикладення робочої напруги.

Значення коефіцієнта заповнення ВАХ (FF), напруги розімкнутого кола ( $V_{pk}$ ) та струму короткого замикання ( $I_{kz}$ ) дозволяють отримати максимально можливе значення ККД.

### 1.3. Послідовний та шунтуючий опір, їх вплив на вихідну потужність сонячних елементів

Послідовний та шунтуючий опори у кремнієвих сонячних елементах є одними із ключових параметрів, вони визначають на скільки є ефективним фотоперетворення і чутливим сонячний елемент в умовах підвищеного рівня освітленості.

Темнова та світлова вольт-амперні характеристики дозволяють якісно проаналізувати безпосередній вплив внутрішніх опорів на вольт-амперні характеристики фотоелектричного перетворювача. [7]

У I та IV квадранті розташована світлова характеристика (рис. \_\_), вона складає з темною прямою лінію. Аналізуючи кут нахилу до прямої осі струму, можна отримати характеристику послідовного опору

$$R_{ser} = \Delta U_{прм} / \Delta I_{прм}, \quad (1.1)$$

Де, вимір  $\Delta U_{прм}$  та  $\Delta I_{прм}$  проходить в області, що є близькою до напруги холостого ходу.

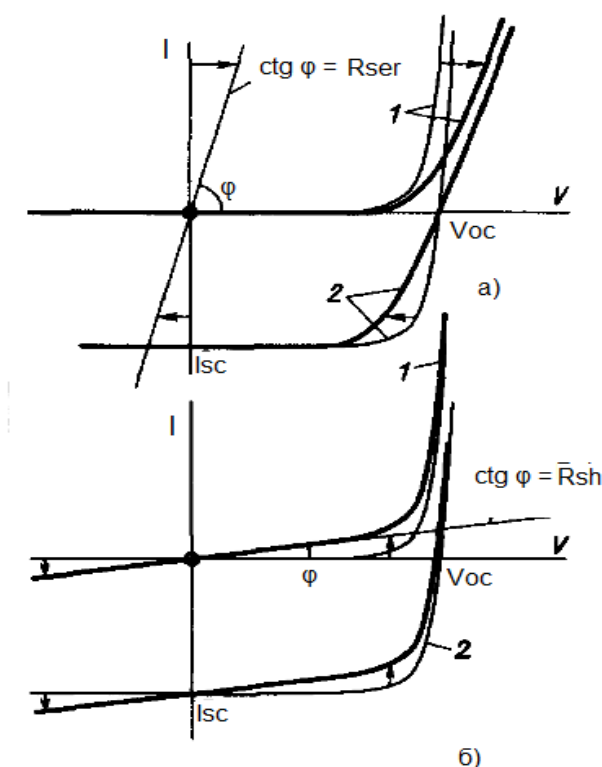


Рисунок 1.6 - Вплив послідовного (а) та шунтуючого (б) опорів на вольт-амперну характеристику кремнієвого сонячного елемента [7]

Ефективніше за все, отримати значення шунтуючого опору  $R_{sh}$ , за допомогою аналізу нахилу вольт-амперної характеристики за умови відсутності освітлення, так як за умови освітлення на вольт-амперній характеристиці точка стуму КЗ знаходиться поряд із нахилом прямої.

$$R_{sh} = \Delta U_{звор} / \Delta I_{звор}. \quad (1.2)$$

За умови відсутнього освітлення вольт-амперна характеристика набуває схожого значення, що й фотострум, цей процес обумовлений тим, що вольт-амперна характеристика характеризує енергію, що використана, як електрична, а також характеризує частину теплових втрат.

Згенерований, фотострум та струм КЗ, сонячним випромінюванням є рівними тоді, коли ФЕП виготовлений правильно. Свій внесок у струм навантаження також зробили згенеровані електрон-діркові пари.

Для того, щоб якісно проаналізувати втрати електричної енергії на опорі, що є послідовним необхідно розглянути вираз повних витрат та виокремити витрати енергії, котрі наступним чином пов'язані з послідовним опором:

$$\Delta_{SER} = I_M^2 \cdot R_{SER} / I_M \cdot V_M = I_M \cdot R_{SER} / V_M , \quad (1.3)$$

Та з шунтуючим опором:

$$\Delta_{SH} = (V_M^2 / R_{SH}) / I_M \cdot V_M = V_M / R_{SH} \cdot I_M \quad (1.4)$$

Можна помітити, що послідовний та шунтуючий опори сприяють зменшенню коефіцієнта заповнення вольт-амперної характеристики:

$$\Delta_{FF} = 100 \cdot (1 - (\Delta_{SER} + \Delta_{SER})) \quad (1.5)$$

## 2. ВИГОТОВЛЕННЯ ФЕП ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ КОНСТРУКЦІЙ

### 2.1. Конструкція фотоелектричного перетворювача та технологія їх виготовлення

На сьогоднішній день існує 3 типи ФЕП, що є широко поширеними:

- Фотоелектричні перетворювачі на основі монокристалічного кремнію;
- Фотоелектричні перетворювачі на основі полікристалічного кремнію;
- Фотоелектричні перетворювачі на основі аморфного кремнії. – тонкоплівкові.

Для промислових та космічних сонячних енергосистем використовують переважно монокристалічні ФЕП.

Монокристалічний кремнієвий сонячний елемент – це елемент що включає поглинач, який є цільним кристалом з напівпровідникової речовини. Такі сонячні елементи переважно виготовляють з кремнію шляхом легування домішками донорними й акцепторними, самі пластини товщиною 300 мкм. Структура, спосіб формування та розташування контактів, розрізняють монокристалічні сонячні елементи на різні типи.

На рис. 2.1 представлена конструкція монокристалічного ФЕП



Рисунок 2.1 - Конструкція фотоелектричного перетворювача виготовленого з кристалічного кремнію [13]

Максимальної ефективності сонячного елемента можна досягти за рахунок максимальної ефективності перетворення, а на це безпосередньо впливає ефективність перетворення сонячного випромінювання(енергії).

Першочерговою задачею є коректування вже існуючих технологічних процесів виготовлення кремнієвих сонячних елементів, для підвищення їх ефективності. Необхідно провести узгодження параметрів емітерного шару з режимом відпалу під час циклу формування контактної металізації. Необхідно, щоб емітерний перехід та антибліковий шар мали властивості гарантуючі максимальне поглинання сонячного випромінювання, враховуючи те, що атмосфера Землі також частково поглинає випромінювання. Також не мало важливим є те, що при врахуванні даного спектру, в тій частині що є короткохвильовою, навіть невеликий ріст спектральної чутливості з додаванням щільності фотоструму і ККД, дозволяє перетворювати спектр AM1,5 в об'ємі ФЕП за рахунок процесу фотогенерації. Зазначені особливості є дуже суттєвими у випадку ФЕП, що використовуються у конструкціях сонячних батарей для космічних апаратів.



## 2.2. Дифузія у твердому тілі

Під час проходження ізотропної дифузії, виникають процеси і їх можна описати поняттям коефіцієнта дифузії:

$$J = -D\nabla N, \quad (2.1)$$

де:

$D$  – коефіцієнт дифузії,

$J$  – щільність потоку атомів, що дифундують,

$N$  – концентрація атомів, що дифундують,

$\nabla$  – оператор градієнта.

Коефіцієнт дифузії, а також анізотропна дифузія є тензорами II рангу:

$$J_i = \sum_j D_{ij} \partial N / \partial x^j. \quad (2.2)$$

$D$  являє собою скалярну величину, так як дифузія – анізотропна та кубічні ґратки – симетричні. Завдяки цьому об'єднується розгляд дифузії в кремнії та її процесу.

P-n перехід, що є плоско паралельним, переважно зустрічається у виробництві фотоелектричних перетворювачів. За рахунок малої концентрації домішки, що дифундує, зміна розмірів кристалів від час процесу дифузії, є не значною, та вони не враховуються, а системою відліку є – кристалічна ґратка:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x}. \quad (2.3)$$

При застосування принципу непереривності потоку до рівняння 2.1, отримуємо рівняння 2.4. для другого закону дифузії Фіка [14]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla(D \nabla N) \quad \dots\dots(2.4)$$

У випадку одновимірному:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad \dots\dots(3.5)$$

Де, при  $\partial N / \partial x = 0$ ,  $x$  і  $t$  є незалежними,  $D$  - постійний для  $x$ , що є ріні ( $D$  і будь-який момент часу можна визначити), тоді (2.5) спрощується:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \left( D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \right), \quad \dots (2.6)$$

де  $N$  - має скінченне значення у всіх точках.

За визначений час відбувається введення речовини в пластину та відбувається її потік через поверхню та дифундування речовини з певною концентрацією, саме ці дифузійні характеристики можна визначити за допомогою граничних умов та коефіцієнтів дифузії. Також для якісного визначення необхідно знаки характер розподілу домішок в данній пластині.

Зазвичай для цього використовують модель твердого, яке є напівнескінченним, та обмеженим площиною  $x=0$ .

Просторова концентрація домішки та її залежність задається граничними умовами, при значенні концентрації домішки, в момент часу, що дорівнює 0. За нормальних умов під час процесу дифундування домішок у напівпровідник, протилежної границі не буде досягнуто не однією з них, а це означає, що процес

дифузії буду відбуватися лише з однієї площини (поверхні, а саме  $x=0$ ). Через це використовують модель твердого, яке є напівнескінченим, та обмеженим площиною  $x=0$ .

Для кожної домішки проходить дифузія, не дивлячись на сумарну концентрацію всіх домішок. Розглядаючи рівня дифузії можна помітити, це тому, що значення  $D$  – стала та не має членів, котрі є відповідальними за взаємну дію домішок.

### 2.2.1. Аналіз та шляхи оптимізації процесу дифузії фосфору для монокристалічного та мультикристалічного кремнію

Легування фосфором – це той технологічний процес, що має вплив на таку пластину, як Si з р-типом провідності та текстурованою поверхнею, та на вихідні параметри фотоелектричного перетворювача.

На сьогоднішній день є не до кінця дослідженим процес, що дозволяє отримати високу рівномірність легування на площині із заданим профілем легування, а це є вагомим фактором у формуванні р-п переходу, що має глибину залягання – 0,3 – 0,5 мкм та високий рівень концентрації ( $N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) поверхневої домішки.

Встановлення здатності матеріалу до збереження властивостей під час впливу температури, є необхідним етапом для якісного визначення параметрів дифузії у пластині кремнію, це обумовлене низькою якістю самої пластини. Час життя неосновних носіїв заряду в об'ємі напівпровідника може характеризувати цю здатність. Так як дифузія фосфором має властивість – гетеруючу (завдяки сегрегації домішок з об'єму пластини до фосфорносілікатного скла під час високотемпературної обробки), в нейтральному середовищі (середовище азоту) було проведено відпал пластин кремнію з участю додання кисню задля уникнення ерозії. З початковими типовими характеристиками кремнієвих мультикристалічних та монокристалічних пластин було проведено дане дослідження, Варто зазначити,

що їх призначення є наземним, та такий тип пластин використовується в серійному виробництві.

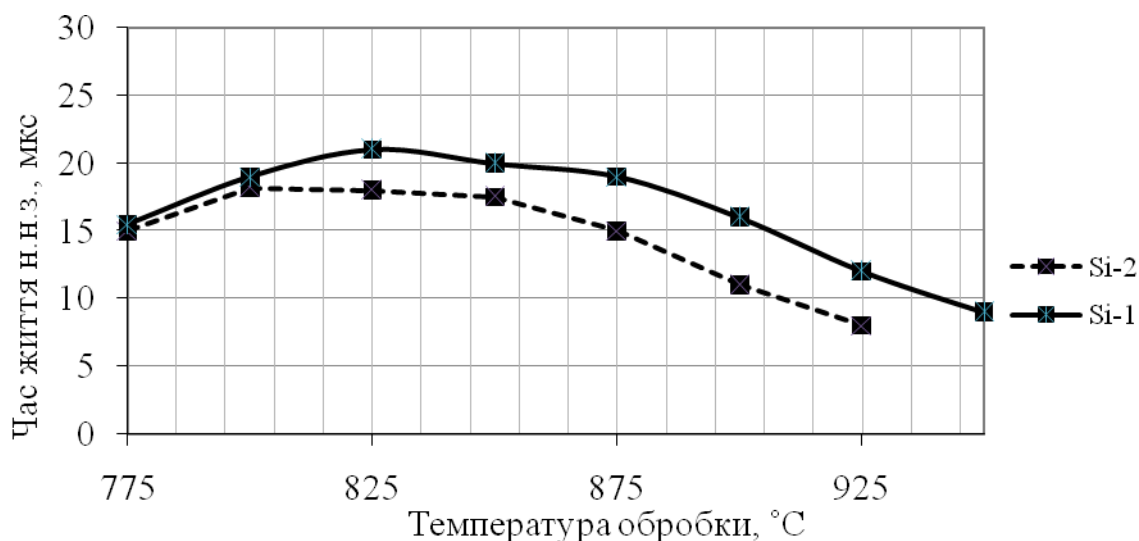


Рисунок 2.2 - Динаміка зменшення часу життя неосновних носіїв заряду. в об'ємі монокристалічної кремнієвої пластини із вмістом вуглеця  $5 \cdot 10^{16} \text{см}^{-3}$  (Si-1) та  $2 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$  (Si-2) під температурним впливом обробки. [14]

На рис. 2.2. представлені результати, що було отримано. Аналізуючи отримані данні, можна сказати, що до зменшення значення  $\tau_{\text{ннз}}$  може призводити якість кремнію, За умов температури не вище  $800^\circ \text{C}$ . Для уникнення явища спаду значення  $\tau_{\text{ннз}}$  „ необхідно проводити процес дифузії фосфору за умов температурного режиму в діапазоні  $800 \dots 850^\circ \text{C}$ .

### 2.2.2. Дифузія домішками

Рівня 2.7 демонструє граничні умови домішки, що дифундує в напівнескінченне тіло через площину  $x=0$ , таким чином, що поверхнева концентрація  $N_0$  постійно підтримується:

$$N(x > 0, 0) = 0 \quad N(0, t \geq 0) = N_0, \quad (2.7)$$

і розв'язком (2.6) є вираз:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (2.8)$$

Сумарна концентрація, у випадку, коли домішка що є основною - не дифундує та з протилежним знаком і об'ємною концентрацією  $N_b$ :

$$N_{\text{ост}} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - N_b. \quad (2.9)$$

Глибина переходу  $x_j$ , де  $N_{\text{ост}} = 0$ , представлена виразом [14]:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} * \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{N_b}{N_0} \right). \quad (2.10)$$

З наведеного рівняння (2.8) можна побачити опис розподілу домішки, при процесі дифузії з газової чи парової фази, у напівпровіднику. На рис. 2.2. зображено як розподіляється домішка за умов різної тривалості проведення дифузії. Щоб  $N_0$  було постійним, необхідно, щоб дифундуюча домішка, мала таку швидкість при надходженні до поверхні, що є відповідною. Описана модель є не дійсно, у випадку, коли межу розчинності дифундуючих речовин у твердому тілі -  $N_0$  переходить, у такому випадку необхідно розглядати інші процеси.

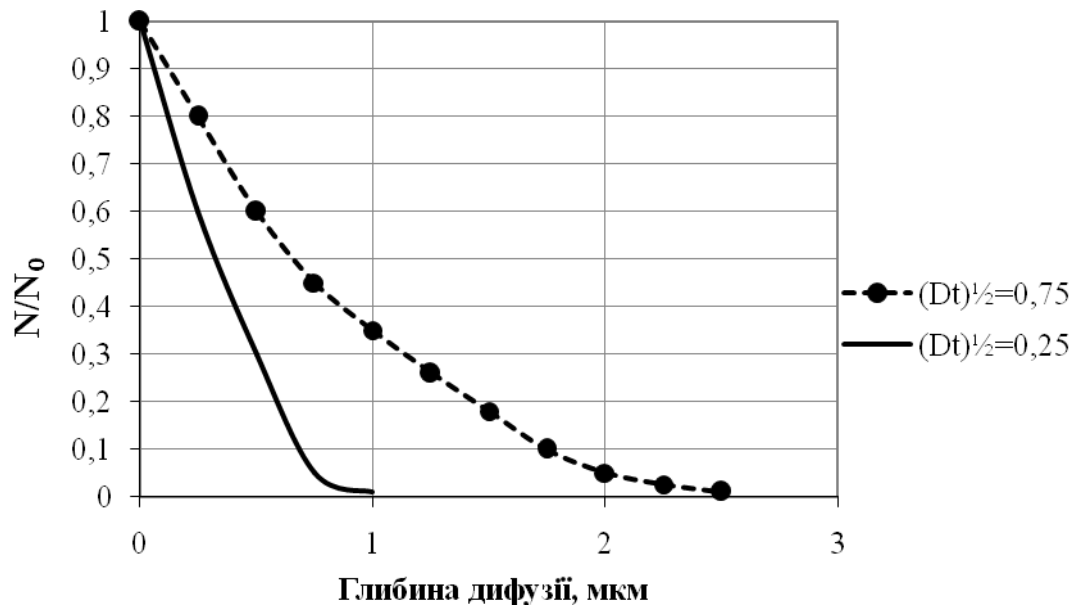


Рисунок 2.3. Дифузія з поверхні зі сталою концентрацією.[14]

Швидкість потоку домішки через поверхню ( $x=0$ ) визначається виразом:

$$J(t) = -D \left. \frac{\partial N}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{DN_0}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \Big|_{x=0} = N_0 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (2.11)$$

Кількість речовини, за час  $t$ , що надійшла в тверде тіло, дорівнює:

$$Q = \int_0^t J(t) dt = 2N_0 \sqrt{Dt/\pi}. \quad (2.12)$$

Рівняння (2.9) виконується за умов невеликої концентрації або проникнення домішки на глибину декілька мікрон. За умов значної концентрації або незначного проникнення домішки, що є протилежним для заданих умов, рівняння не виконується, це є результатом залежності коефіцієнту дифузії від концентрації дифундуючої домішки та існуючих нерівномірних домішок, також через умову скінченного часу для отримання рівноважного значення концентрації на поверхні..

### 2.2.3. Дифузія з обмеженого джерела

Одним із типів граничних умов є непроникність (абсолютна.) Тому у даному випадку необхідно щоб значення потоку домішок було обране в 0 для усіх  $t \geq 0$ , за умов проходження через поверхню  $x=0$ .

$$\left. \frac{\partial N(x, t \geq 0)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.13)$$

Для фактичної реалізації граничних умов 2-го типу, необхідно перед початком процесу дифузії в тверде тіло ввести дифундуючий матеріал. Дифузія із шару, що має рівномірне значення концентрації домішки(початкової) є простим прикладом, виходячи з цього можна представити граничні умов наступним чином:

$$\begin{aligned} N(x, 0) &= N_0, 0 \leq x < h, \\ N(x, 0) &= 0, x > h \end{aligned} \quad (2.14)$$

З такими граничними умовами рішенням рівняння дифузії є вираз:

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left[ \operatorname{erfc} \frac{x-h}{2\sqrt{Dt}} - \operatorname{erfc} \frac{x+h}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad (2.15)$$

(за умов, що  $\operatorname{erfc}(-v) + \operatorname{erfc}(v) \equiv 2$ ).

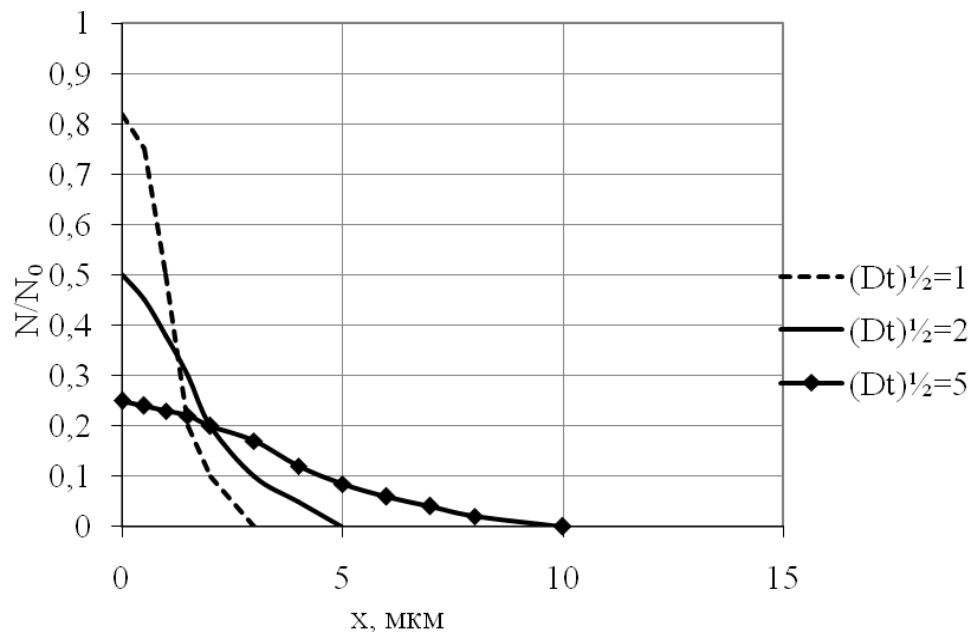


Рисунок 2.4. Дифузія з обмеженого джерела. За умов  $t=0$  негаусовий розподіл для значень  $x$ ; при  $\sqrt{Dt}=1$  Гаусів розподіл для  $0 < x < 1$ ; при  $\sqrt{Dt}=2$  Гаусів розподіл для  $0 < x < 4$ . [14]

На рис. 2.4. показаний вид цієї функції (при  $h=1$ ). Поверхнева концентрація зменшується з часом:

$$N(0, t) = N_0 \left( 1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (2.16)$$

Якщо поблизу точки  $x/2\sqrt{Dt}$  праву частину розкласти в ряд Тейлора, то отримаємо:

$$N(x < \frac{Dt}{h}, t > \frac{h^2}{D}) \approx \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[ - \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right], \quad (2.17)$$

де  $Q \equiv N_0 h$  є загальною кількістю в твердому тілі домішки, у кожний момент часу.

Виходячи з цього концентрація, що є поверхневою дорівнює:



$$N(0, t > \frac{h^2}{D}) \approx \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} < N_0, \quad (2.18)$$

це відповідає представленому вище рівнянню (2.16). Рівняння (2.17) являє собою розподіл Гауса по координаті  $x$ .

На основі отриманих результатів було побудовано моделі дифузії фосфору, за температурних умов вище ніж допустимі для сонячного кремнію. [14] Температурний діапазон для дослідження дифузії фосфору складав 700-1300°C та 1000-1300°C, така дифузія не може вважатись низькотемпературною, бо її умовою є температура менше 900°C.

Порівняння реального класичного процесу та процесу з моделями, процесу в потоці газу носію, дифузії фосфору з рідкого джерела, дає розуміння, що початкові умови не виконуються. Реальний процесу дифузії проходить за умови, створення шару, на поверхні, фосфоросилікатного скла, яке являється нескінченним джерелом дифузії. Також з рис. 2.4. видно, що при збільшенні тривалості проведення дифузії збільшується поверхнева концентрація фосфору.

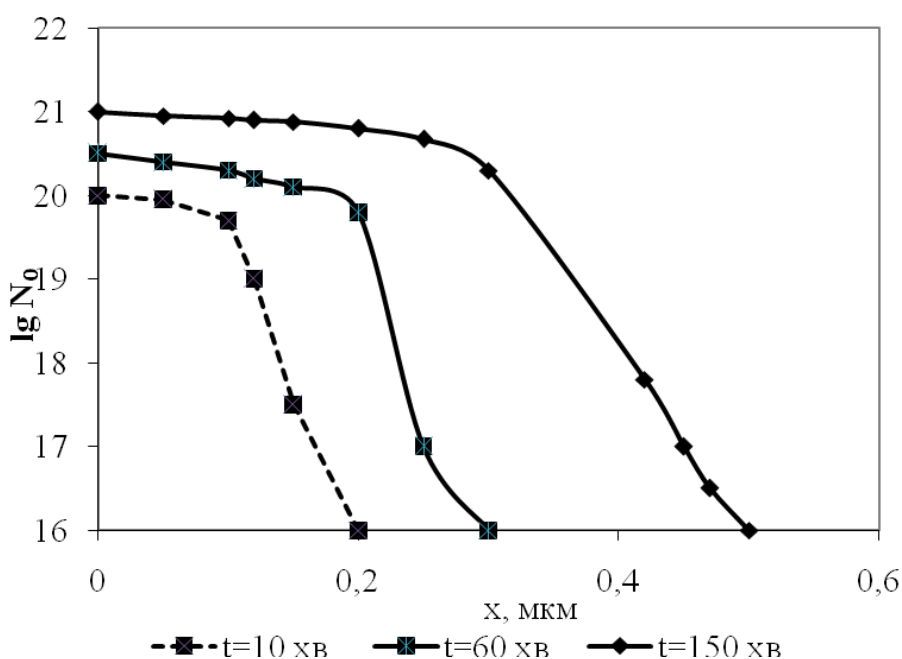


Рисунок 2.5 - Профілі розподілу фосфору в пластині кремнію в залежності від тривалості проведення процесу. Процес проведено в пластині з полірованою

поверхнею марки КДБ-1 в ДВСЕіМ ВАТ «Квазар». (отримано за допомогою методу ВІМС) [14]

Є доцільним виокремити такі обмеження, на основі розглянутих основних положень дифузії та за умов використання класичних моделей для створення у фотоперетворювачі емітерного шару:

1. Процес дифузії з температурним діапазоном - 1000-1200°C. Обробка пластин Si – не вище 900°C.
2. Формування емітерного переходу на глибині – 0.3-0.5 мкм.
3. Проведення процесу дифузії за умови наявності шару фосфорносилікатного скла – проміжне джерело дифузії, на поверхні пластини.
4. Врахування того, що швидкість перебігу дифузії залежить від стану поверхні, тобто за умов не полірованої та шліфованої пластини.

Теоретична-апріорна база особливих механізмів дифузії не може бути визначена, так під час виробництва фотоперетворювачів, передбачена робота та проведення дифузії на глибині менше 1 мкм. Для цього експериментально було проведено дослідження емітерного шару, створеного дифузією фосфору з рідкого джерела в потоці газу носія та визначено параметри які мають вплив на дифузії, а саме: температурні та часові залежності. Було використано таке обладнання, матеріали та режими процесів, як при створенні(виготовленні) кристалічних фотоелектричних перетворювачів.

### 2.3. Дифузія фосфору при створенні *p-n* переходу для ФЕП

Для процесу дифузії висуваються наступні вимоги(при серійному виробництві):

1. При одночасній обробці, кількість пластин має бути максимальною.
2. Тривалість проведення процесу дифузії має біти мінімальною.

3. Параметри, що задані – концентрація, глибина має бути рівномірними від партії до партії, від пластини до пластини.
4. Має бути заданий рівень гетерування та профіль легування, фонових домішок і фосфору відповідно.

Для досягнення високої продуктивності та високих технічних характеристик фотоелектричних перетворювачів, необхідно забезпечення стабільних умов проведення процесу дифузії.

Рідкі джерела  $\text{PCl}_3$  або  $\text{POCl}_3$  переважно використовуються для проведення процесу дифузії. Текстурована поверхня є особливістю при формуванні емітерного шару, приклад такої поверхні зображений на рис 3.15, висота пірамідок знаходиться в діапазоні від 3 до 7 мкм. Поверхня з рельєфом є причиною збільшення фото активної площі поверхні та зменшення коефіцієнта відбиття світла.

Процес дифузії було проведено в пластини монокристалічного кремнію при температурних умовах -  $800^\circ\text{C}$ - $870^\circ\text{C}$  у системі - відкритій з джерелом  $\text{POCl}_3$ .

Експериментально було досліджено що закон Фіка не описує процес дифузії при заданих температурних умовах дифузії з нескінченного та обмеженого джерела. Механічна напруга та стан поверхні спричиняють вплив на коефіцієнт дифузії. Методом ВІМС було отримано профілі розподілу фосфору, отримані результати зображено на рис 2.6. Температурний режим практично не впливає на розподіл фосфору в області з глибиною дифузії від 0.1 до 0.2 мкм, відміність виникає при температурі  $870^\circ\text{C}$ . На глибині менш ніж 0.1 мкм відбувається поглинання випромінювання, що є короткохвильовим, в спектральному діапазоні від 350 до 560 нм.

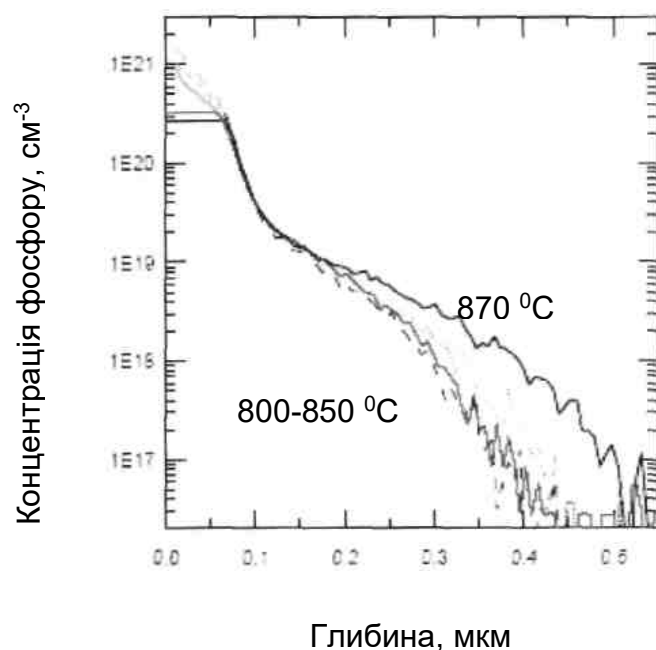


Рисунок 2.6 - Профіль розподілу фосфору в кремнії р-типу провідності для температур 800-870<sup>0</sup>С (метод ВІМС). [14]

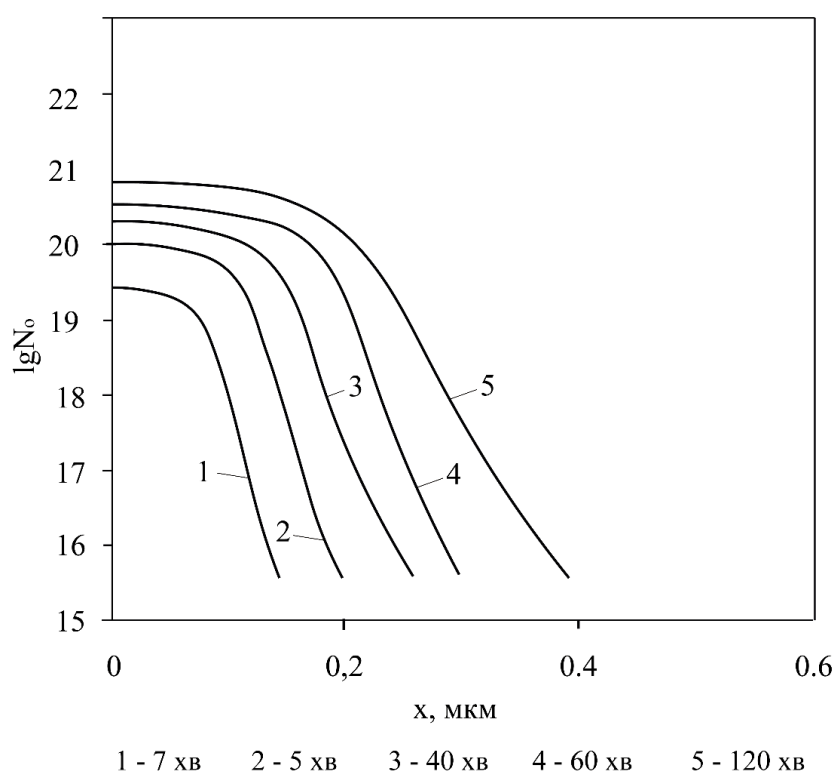


Рисунок 2.7 - Профілі розподілу фосфору в пластині кремнію в залежності від тривалості проведення процесу (метод ВІМС) [14]

## 2.4. Текстурований кремнієвий елемент

Іншими словами текстурований елемент це той, що не відбиває випромінювання світла та є прикладом сонячного елемента досконалої конструкції. Відсутність поверхневого відбиття дозволяє покращити характеристику вихідного струму, впливає на тривалість життя ННЗ та термін експлуатації. А саме, збільшити тривалість життя фотоелектричних елементів та збільшити ККД, напругу та струм, при правильних умовах обробки.

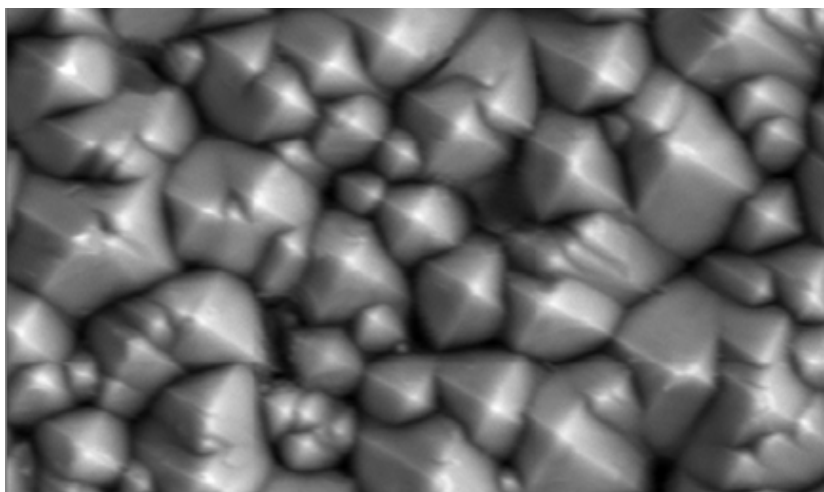


Рисунок. 2.8 - Текстурована поверхня монокристалічного кремнію (знімок за допомогою РЕМ). Кремній р-типу, орієнтація - (100), виготовлений травленням в лужних розчинах. Висота пірамід 3-7 мкм.. [14]

Отже за допомогою текстурованої поверхні можливо вирішити дві важливі задачі: зменшити оптичні втрати за рахунок багатократного відбиття від граней пірамідок текстури та приблизити область фотогенерації носіїв заряду до електронно-діркового переходу, що дозволяє збільшити ефективність збору  $\eta_Q$  носіїв. Збільшення шляху світла в елементі еквівалентно збільшенню коефіцієнту

поглинання світла. Густина струму КЗ в такому елементі є на 10-15% вище, аніж у фіолетового елемента.

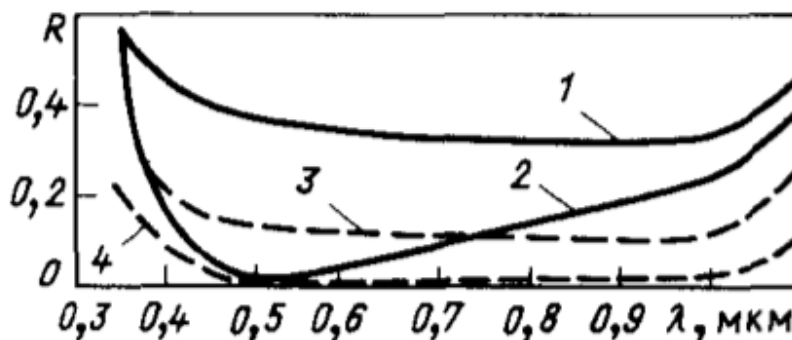


Рисунок 2.9 - 1,2 – відповідає полірованій поверхні без освітлення, 3,4 – текстурована поверхня елемента без освітлення[7]

## 2.5. Вплив конструктивно-технологічних параметрів кремнієвих ФЕП на параметри ННЗ

Ефективність перетворення енергії СЕ головним чином залежить від концентрації дефектів, що впливають на час життя неосновних носіїв заряду  $\tau$  в активних шарах ФЕП.

Ріст неосновних носіїв заряду, спричиняє не тільки зростання струму короткого замикання, а також напруга холостого ходу, що внаслідок призводить до зменшення зворотно струму насичення. Не менш важливим параметром є питомий опір.

Спричинені дефекти можна розподілити на дві групи:

- Структурні дефекти – дислокації, атоми між вузлів, двійники та малокутові границі зерен.
- Домішки – впроваджені чужорідні атоми або заміщення.

Чужорідні домішки у результаті взаємодії зі структурними дефектами утворюють дефектні комплекси. Самі дефекти можуть бути електрично активними та пасивними(неактивними).

Електрична активність, у якості донора, акцептора або рекомбінаційного центра, може бути визначена положення енергетичного рівня в заборонені зоні напівпровідника та положенням квазірівня Фермі.

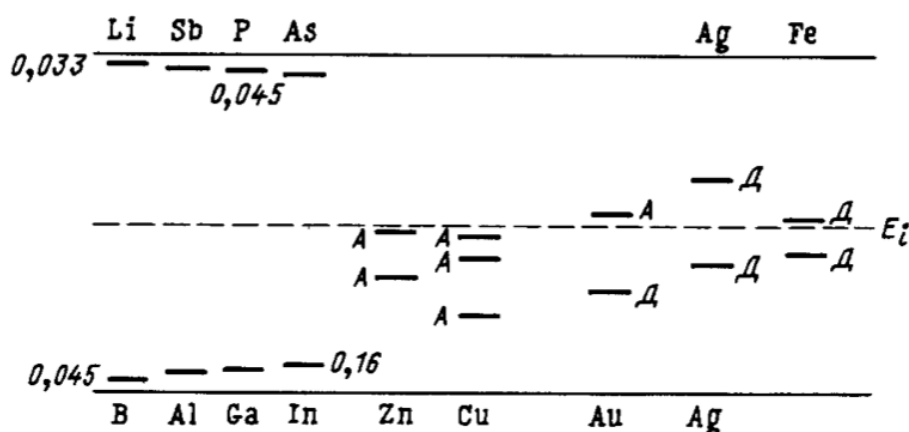


Рисунок 2.10 - Енергії іонізації різних домішок в кремнії[7]

Зазвичай, рівні, розміщені у межах декількох кТ від зони провідності або валентної зони, являють собою ефективні донори або акцептори, але не являють собою рекомбінаційні центри. Зворотне твердження є справедливим для близьких до центра ЗЗ, особливо це стосується глибоких донорноподібних або акцепторноподібних станів у матеріалі р чи n типу, що являють собою ефективні рекомбінаційні центри. Такі рекомбінаційні центри здатні знизити час життя носіїв заряду. На рис. \_\_ проілюстровано енергетичні рівні різних домішок в кремнії. Енергії донорів (Д) та акцепторів (А) відраховуються від дна зони провідності для центрів, що розташовані вище середини ЗЗ та від «стелі» валентної зони для центрів, що розташовані нижче середини ЗЗ.

Час життя  $\tau$  лінійно залежить від концентрації домішок, котрі є допустимі для виготовлення СЕ. Особливо небезпечними домішками для кремнію є домішки Na, Cu та Fe, оскільки вони мають високі коефіцієнти дифузії. Концентрація Au в

кремнії не повинна перевищувати  $10^{-7}\%$ . Дефекти або домішки, що введені у процесі росту кристалу вказують особливий вплив, діапазон змінених часів життя носіїв заряду може бути достатньо великим.

Значна зміна  $\tau$ , може відбуватися за рахунок утворення комплексів домішок та інших дефектів у процесі термообробки при відносно низьких температурах.

Також, на час життя нерівноважних носіїв заряду, має вагомий вплив товщина базових кристалів кремнію, з пластинами різних типів поверхнями – текстурованою або полірованою. Величина ННЗ росте зі зменшенням товщини базових кристалів рис 2.10. За рахунок повного вивільнення об'єму базових кристалів кремнію при досягненні певної товщини в результаті хімічного утоншення від глибоких мікро-тріщин, що унаслідуються при вирізанні із монокристалічного кремнію з вихідним часом життя ННЗ не менше 100мкс. Для підвищення значень ККД та масопотужних характеристик та час життя ННЗ важливо враховувати, що текстурування та стоншення базових кристалів з орієнтацією 100, шляхом глибокого хімічного травлення у водневому розчині лугу мають вагомий та рішачий вплив.[7]

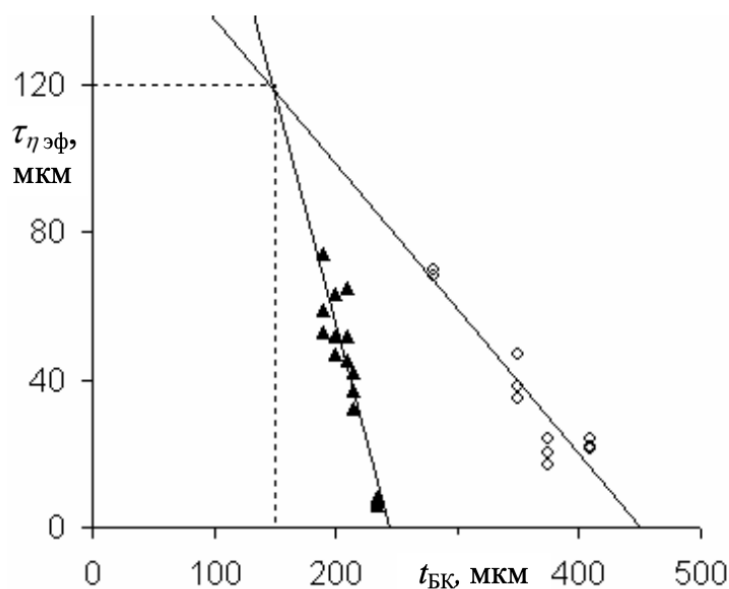


Рисунок 2.11 - Залежність ефективного часу життя ННЗ в р-області ФЕП від товщини базових кристалів з полірованою(ромб) та текстурованою (трикутник) лицьовими поверхнями



**Висновки:**

Розглянуто процес дифузії фосфору, особливості та вимоги до неї, та конструктивне представлення фотоелектричних перетворювачів. Проаналізовано чинники, котрі необхідно оптимізувати для отримання більшої ефективності перетворення та збільшення ККД.

Розглянуто вплив рельєфу на електричні параметри ФЕП. Залежність ефективності перетворення енергії СЕ від концентрації дефектів, що впливають на час життя неосновних носіїв заряду  $\tau$  в активних шарах ФЕП.

### 3. СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ У КОСМОСІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ

#### 3.1. Основні типи ФЕП космічного призначення

Сонячні елементи є перспективними для їх використання у космосі. В умовах космосу важливими характеристиками є співвідношення виробленої елементом потужності до його маси та радіаційної стійкості. За допомогою ефективної роботи ФЕП, сонячні батареї живлять електричною енергією супутники(їх апаратуру), системи космічних станцій та кораблів та електрохімічні акумулятори, що використовуються на частинах орбіти, що знаходиться у тіні. [20]

Важливими факторами для ефективної експлуатації фотоелектричних перетворювачів у космосі під впливом підвищеної радіації та можливість функціонування в умовах високої концентрації сонячного випромінювання, є наступні фактори:

- Підвищення коефіцієнта корисної дії;
- Продовження терміну.

Так як у просторі космосу відбувається радіаційна деградація, необхідно, щоб просвітлюючі покриття СЕ були стійкими, а електронно-дірковий перехід, був сформований глибоко, також важливою складовою є наявність квантових структур для збільшення ККД. Тому в наш час переважно використовуються такі типи фотоелектричних перетворювачів:

1. Тонко плівкові фотоелектричні перетворювачі
2. Гетеро структурні фотоелектричні перетворювачі
3. Кремнієві монокристалічні фотоелектричні перетворювачі

Тонкоплівкові фотоелектричні перетворювачі підходять для створення гнучких сонячних батарей в основі яких лежить аморфний кремній з максимальною

питомою енергомасовою характеристикою та з мінімальною вартістю. Використання таких елементів є перспективним для трьохкаскадних ФЕП. Для даного типу немає необхідності використовувати операцію нарізки та шліфування для отримання продукту великої площі, а також виготовлення таких елементів можливо за відносно низьких температур, приблизно  $300^{\circ}\text{C}$ , це дозволяє використовувати скляні підкладки та зменшити обсяг використаного кремнію.

Не дивлячись на переваги використання даного типу елементів, є суттєве обмеження – це можливе максимальне значення коефіцієнта корисної дії, що становить 12%.

Гетероструктурні фотоелектричні перетворювачі дозволяють отримувати багатокаскадні ФЕП з використанням складних напівпровідникових матеріалів. Мають досить велике значення коефіцієнта корисної дії – 25-30%, що дозволяє ефективно їх використовувати в умовах космосу. GaAs, що лежить в основі створення таких елементів є відносно нечутливим до нагріву сонячних батарей, має високу радіаційну стійкість та ефективність з мінімальною деградацією при тривалій експлуатації.

Генерація носіїв заряду залежить від обраних шарів складу фотоелементу. Лише велика вартість таких елементів, не дозволяє масове використання гетероструктурних ФЕП у недорогих некомерційних проектах.

Кремнієві монокристалічні фотоперетворювачі має відпрацьовану та ефективну технологію виготовлення. Мають меншу деградацію та триваліший термін експлуатації ніж наземні аналоги та вищу питому енергетичну характеристику. Важливою особливістю є чутливість таких елементів з обох сторін, що дозволяє збільшити вихідну потужність на 10-15%. Характеристики такого типу сонячних елементів залежать від кількості випромінювання, що потрапляє на площину. Максимально можливий ККД складає 16-19%, на значення

ККД та напруги впливає нагрів елемента, при нагріванні на  $1^{\circ}\text{C}$  вище  $25^{\circ}\text{C}$  він втрачає приблизно  $0.002\text{В}$  та зменшується коефіцієнт корисної дії. [21].

### 3.2. Середа експлуатації ФЕП

Середовище, а саме параметри орбіти на якій знаходиться КА суттєво впливають на ступінь деградації сонячного елемента. Висота орбіти обирається з урахуванням задач польоту. Існуючі орбіти умовно поділили, в залежності від висоти, на наступні типи[2]:

1. Навколоземні низькі орбіти – до 800 км;
2. Навколоземні середньої висоти орбіти – від 800 до 1200 км;
3. Навколоземні високі орбіти – від 1200 км;
4. Геосинхронні – приблизно 35 000 км.

Безпілотні супутники Землі та КА особливого призначення, супутники які керуються та космічні лабораторії знаходяться на орбітах висотою до 800 км.

Також окремо можна виділити орбіти, що слугують для функціонування КА, що призначенні вирішувати прикладні та наукові задачі. Такі орбіти мають різний кут нахилу відносно екватору та різні значення висоти.

Таблиця 3.1 - Характеристики орбіт з різними параметрами [3]

Орбіта	Висота, км	Нахил, рад
Орбіта МКС	350-400	51,6
Сонячно-синхронна орбіта	800-1000	98-100
Система ГЛОНАСС	19100	64,8
Геостаціонарна	35790	0

Для космічних апаратів, що знаходяться на низьких орбітах, приблизно 770 км, та використовують для живлення сонячні батареї на основі кремні. Та гетероструктур, деградація складає 15% та 5% за умов експлуатації протягом 5ти років. Космічні апарати, що знаходяться на геостаціонарних (35 790км) орбітах, параметр деградації складає 31% для кремнієвих елементів та 16% для елементів на гетероструктурах, при експлуатації 15 років. При експлуатації КА на радіаційно-небезпечних орбітах вплив збільшується та параметр деградації складає – 49% та 22% за 5 років експлуатації. Тому є доцільним використання кремнієвих ФЕП для живлення космічних апаратів, що будуть експлуатуватися на низькій навколоземній орбіті.

Інші орбіти є зчними для таких цілей як наприклад, для фотозйомок Земної поверхні, зручно, коли умови освітлення є однаковими у кожен момент, тому для даних цілей переважно обирають орбіту – Сонячно-синхронну.

Орбіта глобальної навігаційної супутникової систем ГЛОНАСС є дуже зручною для забезпечення високої точності виміру координат об'єктів, що знаходяться на земній поверхні та у земному просторі.

За необхідності того, що КА мав одну й ту саму кутову швидкість та перебував над однією точкою, його доцільно розмістити на геостаціонарну орбіту, що дозволить до того ж ретранслювати сигнали.

Як уже зазначалось, більшість космічних апаратів прикладного та наукового призначення функціонує в навколоземному космічному просторі. Для їх правильної та ефективної експлуатації необхідно врахувати вплив космічного середовища на елементи та матеріали СБ та КА.

### 3.3. Вплив космічного середовища на сонячні елементи

Важливо відмітити, що на різних орбітах, різної висоти космічне середовище має різний вплив на роботу СБ, так як корпускулярна радіація, нагрівання, магнітне поле та ін., впливає на параметри та ефективність перетворення світлової енергії у електричну.

#### 3.3.1. Магнітне поле

Магнітне поле характеризується тим, що воно захоплює заряджені частинки, що падають в нього. Таким чином магнітосфера Земної кулі є заповненою протонами, електронами та іонами з різними рівнями енергії, разом вони складають радіаційні пояси.

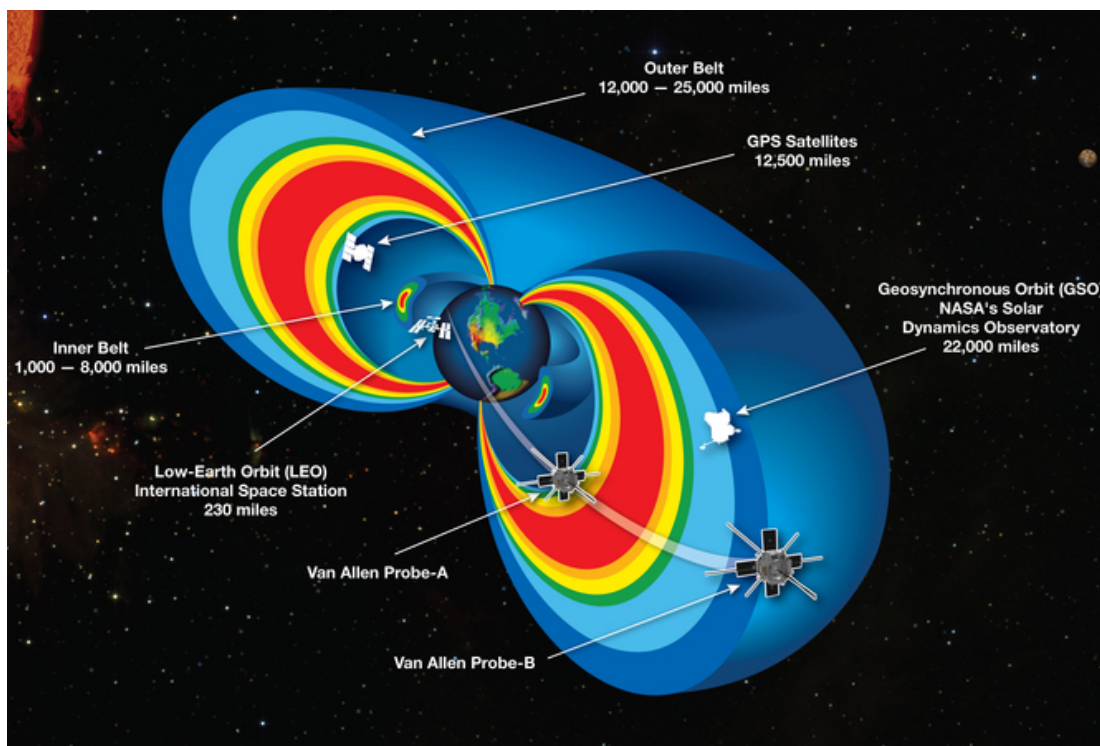


Рисунок 3.1 - Радіаційні пояси Землі [22]

Із центра Землі виходять силові магнітні лінії або геомагнітні. Вони в змозі змінити механічні та електрофізичні властивості кремнію, що у свою чергу не завжди є доречним. Ці поля спричиняють вплив на відповідні за положення КА системи до того ж власне магнітне поле КА починає взаємодіяти з магнітним полем Землі, що призводить до виникнення моменту сил. Краще уникати виникнення цього явища, за допомогою спеціального розташування електричних кіл сонячних батарей. [9]

Потоки плазми, газу та електромагнітних променів, є основними чинниками, що чинять вплив, в магнітосфері Землі та іонній сфері, на сонячні елементи. Під час взаємодії інтегральних комплексів з факторами середовища навколо супутника, відбуваються зміни електричної потужності СЕ.

УФ випромінювання потрапляючи на поверхню захисного скла, активує фотохімічні реакції та стимулює процес полімеризації компонентів в результаті чого змінюються оптичні властивості та зменшується потік світла, що

перетворюється, що у свою чергу призводить до спаду електро-потужності сонячного елемента.

### 3.3.2. Тепловий вплив космічного середовища

Робоча температура та параметри сонячної батареї залежать переважно від нагріву прямими променями сонця та відбите випромінювання.

Альbedo – іншими словами відбите сонячне випромінювання, визначається, як відношення відбитого поверхнею планети потоку випромінювання до падаючого на неї потік випромінювання. Вплив такого типу випромінювання неоднозначно позначається на сонячних батареях.

З однієї сторони енергія відбитого випромінювання знаходиться у межах спектрального діапазону чутливості сонячного елемента, та є ймовірність зростання потужності, а з іншої сторони додатковий потік енергії підвищує температуру сонячної батареї, що у свою чергу може викликати зменшення коефіцієнта корисної дії. Тому використовуючи фотоелектричні перетворювачі, що є чутливими до випромінювання з обох сторін, ефект альbedo, можна використати у цілях підвищення ефективності.

Експлуатація ФЕП космічного призначення на низьких орбітах умови термоцикування складають - 150°C ... +70°C. При підвищенні температури атом, іон або молекула можуть переходити із одного положення в інше в результаті подолання енергетичного бар'єру  $E_a$  із ймовірністю:

$$\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \quad (3.1)$$

Де



$k$  – стала Больцманна ( $8.617 \cdot 10^{-5}$  еВ/К);

$T$  – абсолютна температура;

Внаслідок цього можна описати швидкість  $r$  – з якою відбуваються фізичні та хімічні процеси, це можливо виразити використовуючи рівняння Арреніуса:

$$r = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \quad (3.2)$$

Це рівняння є експоненціальним та приблизно описує хімічні процеси та процес деградації, молекулярні зміни в ізоляційних матеріалах та дифузію домішок та ін.

Визначити час ступеня деградації  $\tau_2$  при певній температурі  $T_2$  можна визначити за допомогою рівняння:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \exp\left[-\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] \quad (3.3)$$

Де

$\tau_1$  – ресурс сонячної батареї при температурі  $T_1$ .

Щільність фотоелектричного перетворювача залежить від щільності електричного струму, що проходить через кристал. Якість матеріалів контактної системи та матеріалу бази також визначають термічну деградацію. Є не бажаним вміст хрому, ніобію та срібла в кремнії, вони значно скорочують термін ефективної експлуатації ФЕП. Причиною є також утворення силіцидів металів на переході напівпровідник-контакт, це призводить до шунтування електронно-діркового переходу.

Теплове випромінювання планети, також є неоднозначним.

Випромінювання та нагрів такого типу може спричинити до додаткового нагріву батарей, на освітленій частині, що може призвести до зменшення потужності. Але у випадку, коли КА знаходиться на неосвітленій ділянці, таке явище набуває позитивного характеру – батарея додатково нагрівається та перепад температур має менший вплив, що допомагає подовжити термін експлуатації

фотоелектричних перетворювачів в даних умовах. Величина теплового потоку у межах інфрачервоного спектра складає – 200 – 300 Вт/м<sup>2</sup>

Створення дифузійних бар'єрів є ефективним засобом зменшення впливу деградації. Контакти Si-Al характерні взаємною електроміграцією та дифузією, ці процеси є основними причинами деградації сонячного елемента, та можуть привести до утворення пустот під металізацією, та заповнення цих пустот алюмінієм. Для уникнення цих процесів та підвищення терміну експлуатації контактів, доцільно використовувати багат шарову металізацію - Al-Mo, Ti- Mo-Ag, Ti-Pd-Ag.

### 3.3.3. Космічна радіація

Фотоперетворювачі, що експлуатуються у космосі, підвергаються впливу корпускулярним потокам радіації. Протони, електрони та  $\alpha$ -частинки - знаходяться у космічному просторі та захоплюються магнітним полем Земної кулі. Склад корпускулярного випромінювання відрізняється на різних висотах.

Таблиця 3.2 - Склад космічного випромінювання від висоти орбіти[2]:

Висоти орбіти для космічного апарату, км	Склад корпускулярного випромінювання
0-250	Майже відсутнє
250-1600	Електрони і протони радіаційних поясів
1600-50000	Електрони радіаційних поясів, $\alpha$ -частинок сонячних спалахів
Вище 50000	Протони та $\alpha$ -частинок сонячних спалахів

Щільність радіаційних потоків та енергія часток розподіляються нерівномірно. Але радіаційні пояси Земної кулі у двох місцях спостерігається більша за всі інші щільність частинок, які виникли за допомоги магнітних полюсів нашої планети. Магнітне поле захоплює протони, іони та електрони з різними енергіями та заповняє магнітосферу частинками, що є зарядженими. Ті пояси що утворилися можна поділити (умовно) на внутрішні та зовнішні. А їх положення визначають  $L$  - відстанню до осі диполя, котрий сформував магнітне поле Земної кулі та симетрично відносно неї розміщенні радіаційні пояси. Ці пояси розміщенні наступним чином:

- Внутрішній радіаційний пояс -  $1,2 < L < 2,5$ ;
- Зовнішній радіаційний пояс – до  $L=8$ ;

Між цими поясами утворений проміжок, розмірами приблизно  $L=2,5 \dots 3$ , саме у цьому проміжку – мінімальний потік електронів. Розподіл частинок у середовищі та зміни інтенсивності є характерними для зовнішнього поясу, враховуючи, що вони є з енергією протонів до декількох MeV та електронів від keV-MeV. Радіаційний пояс є стабільним у випадку коли енергія протонів та електронів – 30MeV та 100 keV відповідно.

Основний негативний чинник впливу космічної радіації – центри рекомбінації. Додаткові центри рекомбінації – це результат зміщення атомів у напівпровідниковому матеріалі ФЕП. Найсильніший ефект викликають електрони з енергією -  $0,2 \dots 1,0$  MeV та протони -  $4 \dots 40$  MeV, саме протони формують стабільну у часі радіацію.

Радіаційну деградацію також може спричиняти таке сезонне явище, як спалахи на поверхні сонця, які характеризуються викидом великої кількості протонів. Таке явище спричиняє небезпеку для фотоелектричних перетворювачів космічного призначення, своєю властивістю екранізації поряд з магнітосферою

Земної кулі. УФ промені можуть мати негативний вплив на параметри та характеристики сонячних елементів.

Планети Сонячної системи мають свої радіаційні пояси. Наприклад Юпітер має сильне магнітне поле, яке характерне інтенсивним потоком частинок. Меркурій має не таке сильне магнітне поле, котре не формує зони, що захоплюють зарядженні частинки, та й у його поля є характерна особливість енергія потоків електронів 0,3 MeV, а це більше ніж рівень міжпланетного простору. Біля планети Земля є внутрішнє та зовнішнє поле, внутрішнє поле має потоки електронів з високою енергією і у декілька разів менше, .

#### 4. КОНТАКТНІ СИСТЕМИ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

##### 4.1. Технологія виготовлення контактів

Існує основна, технологічно відпрацьована, технологія виготовлення металевих контактів - вакуумна техніка нанесення плівки;

Зазвичай при виготовленні використовуються такі багатошарові системи, як Ti /Pd/Au [23,24] або Ti/Pd/Ag [26]. Титан забезпечує хорошу контактну адгезію, а паладій виступає у ролі дифузійного бар'єру та проміжного адгезивного шару, але основним недоліком даної системи є те, що використання дорогоцінних металів значно підвищує собівартість та витрати на виготовлення. Тому, так, як основною задачею є зменшення собівартості та підвищення ефективності було проведено аналіз та підбір матеріалів зі схожими фізико-хімічними властивостями.

Для подальших досліджень та оптимізації СЕ було обрано систему - Ti / Мо / Ag. Срібло замінює шар золота, а молибден – шар паладію, та виступає у ролі бар'єрного шару. Ця контактна система, може бути ефективно використана для створення контактних систем елементів для сонячних елементів космічного призначення, так як електрохімічний потенціал є сталим, що дозволяє використання цієї системи без значних втрат.

Більш детально розглянемо технологію виготовлення контактної системи для кремнієвих ФЕП.

Контактна система виготовляється методом підривної фотолітографії з послідовним нарощуванням контактної системи товщиною, що становить 10-12 мікрон. Наступним кроком є нанесення фоторезисту на оброблену(помиту) пластину, на якій було проведено процес дифузії, створюється електронно-дірковий(p-n) перехідна лицьовій та та тильній ізотипній(p+) сторонах, на лицьовій стороні проводиться фотолітографія з малюнком, що є обернений до малюнку

контактної системи. Після чого наступним кроком є напилення послідовних шарів титан-молібден-срібло, загальна товщина якого складає не більше половини товщини фоторезисту, а саме не більше ніж пів мікрона. Далі маскуючий фоторезист і шар титан-молібден-срібло, котрий є не потрібним, знімається шляхом жертвенного резисту в розчинні (наприклад, у розчині ацетону). Після проведених процедур, залишається контактна система, що відповідає заданому малюнку. Нарощування срібла є наступним етапом, цей етап проводиться у гальванічних ваннах. Слідуючий етап це – формування контактної структури алюміній-титан-молібден-срібло.

Розглянемо детально процес літографії. Літографія – це спосіб формування рельєфу (рисунок, топології) в шарі металу, діелектрику чи напівпровіднику. Процес літографії реалізується за допомогою використання спеціальних матеріалів – фоторезистів, що є чутливими до зовнішнього випромінювання та здатні переходити у нерозчинне, є стійкими під дією травників або навпаки, та одночасно вони мають бути володіти високою стійкістю до впливу зімічних агресивних середовищ.

Літографія проводиться по технологічному шару, що є нанесеним на поверхню напівпровідникової, в цьому випадку кремнієвої пластини.

Процес літографії можна розділити на такі етапи:

1 етап – формування суцільного шару резисту на поверхні підкладки.

1.1. Підготовка поверхні підкладки

1.2. Нанесення шару фоторезисту

1.3. М'яка термічна сушка фоторезисту

2 етап – Створення рельєфної структури

Та зазвичай наступним кроком є проявлення фоторезисту та задублювання, але в даному випадку слідуючим кроком буде напилення. У наступному розділі

розглянемо більш детально технологічний маршрут виготовлення контактів Ti/Mo/Ag.

#### 4.2. Технологічний маршрут виготовлення контактної системи Ti/Mo/Ag

У цьому підрозділі відображено створений технологічний маршрут для виготовлення кремнієвих фотоелектричних перетворювачів з системою контактів Ti/Mo/Ag.

Процес напилення плівки Ti/Mo/Ag:

Для напилення плівки Ti/Mo/Ag була використана установка вакуумного напилення УРМ 3.279.011.

Перед початком напилення плівки титан-молібден-срібло, було проведено:

1. Ввімкнення установки УРМ 3.279.011.
2. Перекачування зрідженого газу до посудини СК-16.
3. Контроль наявності атмосферного тиску у камері.
4. Переконались що у камері достатньо кисню та немає вакууму.
5. Відкриття камери.
6. Зняття екранів з випарників та заслонку.
7. Ретельне очищення пилосмоком та обробка бяззю із технічним етиловим спиртом.

Проведення процесу напилення:

8. Установка титанової мішені. Перевірка юстирування.
9. Установка молібденової мішені. Перевірка юстирування.
10. Встановлення екранів на випарники.
11. Встановлення срібла на випаровувач.

12. Утримувачі заправити свідками напилення
13. Встановлення на екранах кришки екранів зі свідками.
14. Встановлення в правильному положенні заслінки.
15. Закріплення пластини на спеціальному столі.
16. Очищення столу з пластинами газоподібним азотом.
17. Перший стіл підвести на напилення титану.
18. Відкачати камеру УРМ 3.279.011 до тиску  $1,33 \times 10^{-3}$  ПА ( $1 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст.)
19. Нагрівання блоку підкладки
20. Нагрівання столів до температур 65-80 °С
14. Запуск блоку електронно-променевого випарника
15. Збільшення струму електронно-променевого випаровувача до 350мА
16. Збільшення струму накалу до появи струму променя
17. У центрі титанової мішені встановлення променю
18. Збільшення струму променя до 20-30мА протягом 30-60 с.
19. Зменшення струму до 5-10мА
20. При досягненні необхідної температури столів зменшення напруги нагрівача
21. Витримання столиків при отриманій температурі протягом 3 хв.
22. Зменшення напруги нагрівача до 0В, а потім вимкнути.
23. Збільшення струму променю до 80мА для блоку ЕПВ
24. Підключення омметра до свідка напилення титану
25. Контроль товщини плівки за показниками омметра до досягнення значення 2,0 кОм.
26. Контроль струму променя за міліамперметром блоку електронно-променевого випарника.
27. Контроль тиску в камері за допомогою вакуумметра (не більше  $6,65 \times 10^{-4}$  ПА ( $5 \cdot 10^{-6}$  мм.рт.ст.) )



28. При досягненні 2,0 кОм перекриття заслонкою електронно-променевого випарника.
29. Вимкнення напруги на блоці електронно-променевого випарника
30. Переключення омметра на свідок напilenня молибдену

Після пройденого процесу розглянемо технологічний маршрут нанесення молибдену Мо:

31. Перенесення столика з пластинами на позицію нанесення молибдену.
32. Налаштування позиції електронно-променевого випарника на позицію напilenня молибдену.
33. Включення електронно-променевого випарника
34. Збільшення струму електронно-променевого випаровувача до 350мА
35. Збільшення струму накалу до появи струму променю
36. У центрі молибденової мішені встановлення променю
37. Збільшення струму промення до 40-50мА протягом 30-60 с.
38. Ввімкнення на блоці резистивного випаровувача в положення випарника срібла

Процес напilenня срібла Ag:

39. Збільшення струму випарника до появи червоного відсвічування
40. Прогрів випарника срібла протягом процесу напilenня молибдену
41. Збільшення струму променя до 30 мА
42. Відкриття заслонки
43. Контроль товщини плівки за показниками омметра до досягнення значення 12 кОм.
44. Контроль стуму променю
45. Контроль тиску в камері вакуумметром (не більше  $6,65 \times 10^{-4}$  ПА ( $5 \cdot 10^{-6}$  мм.рт.ст.))

46. При досягненні 12 кОм, перекриття заслонкою електронно-променевий випарник.
47. Ввімкнення високої напруги на блоці електронно-променевого випарника.
48. Переключення омметра на свідок напилення срібла.
49. Переведення столик з пластинами на позицію напилення срібла.
50. Збільшення струму до 4,5 А (без різкого збільшення).
51. Відкриття заслонки.
52. Пункти 49-51 мають виконуватися не довше 20 с.
53. При досягненні опору свідка напилення срібла величини 8 Ом, перекриття заслінкою електронно-променевого випарника.
54. Зменшення струму випарника до 0.
55. Вимкнення живлення випарника срібла.
56. Зменшення струму накали до 0.
57. Вимкнення накали.
58. Відкачка камери до тиску не більше  $2,7 \times 10^{-4}$  ПА ( $2 \times 10^{-6}$  мм.рт.ст.).
59. Втримання пластини в отриманому тиску протягом 30 хвилин.
60. Вимкнення пристрій азотного вловлювача.
61. Ввімкнення прогріву азотного вловлювача через 5хв. На блоці керування вакуумною системою.
62. Прогрів азотного вловлювача протягом 3 хвилин.
63. Вимкнення прогріву азотного вловлювача на блоці керування вакуумною системою.
64. Через 15 хвилин закрити високоовакумний затвор.
65. Напуск повітря в камеру
66. Відкриття камери
67. Зняття столику з пластинами з утримувачу столиків.
68. Зняття пластин та їх розміщення в касету
69. Закриття камери
70. Вимкнення установки

## 71. Визначення товщини напилення шарів мікроінтерферометром

### 4.3. Дослідження виготовлених контактів Ti/Mo/Ag.

Було отримано багатошарові контактні системи на кремнієвих монокристалічних підкладках двома вакуумними методами напилення, для порівняння, методом електронно-променевого напилення та магнетронного напилення.

Таким чином було досліджено вплив умов відпалу, та техніки осадження металевих плівок, на їх електричні та структурні властивості, а також вплив матеріалу лицьового контакту на фотоелектричні характеристики СЕ. Технологія виготовлення сонячних елементів, була описана у попередніх розділах. Відпал, для порівняння, було проведено за наступних умов:

Тиск:  $10^{-4} - 10^{-6}$  Па;

Температура: 100 – 500°C;

Тривалість: 10 – 30 хв.

Сам аналіз було проведено за допомогою наступних приладів:

Аналіз топографії - NanoScope IIIa Quadrexed Dimension 3000(атомно-силовий мікроскоп).

Структурний аналіз - за допомогою дифрактометра Siemens D5000 (в режимі сканування під кутом падаючого променя  $3^\circ$ ).

Склад структур шарів та меж - мас-спектрометр INA-X SPECS GmbH.

Поверхневий опір - методом чотириточкових зондів.

Фотоелектричні характеристики експериментальних зразків - за допомогою PV-тестерів Newport Oriel.

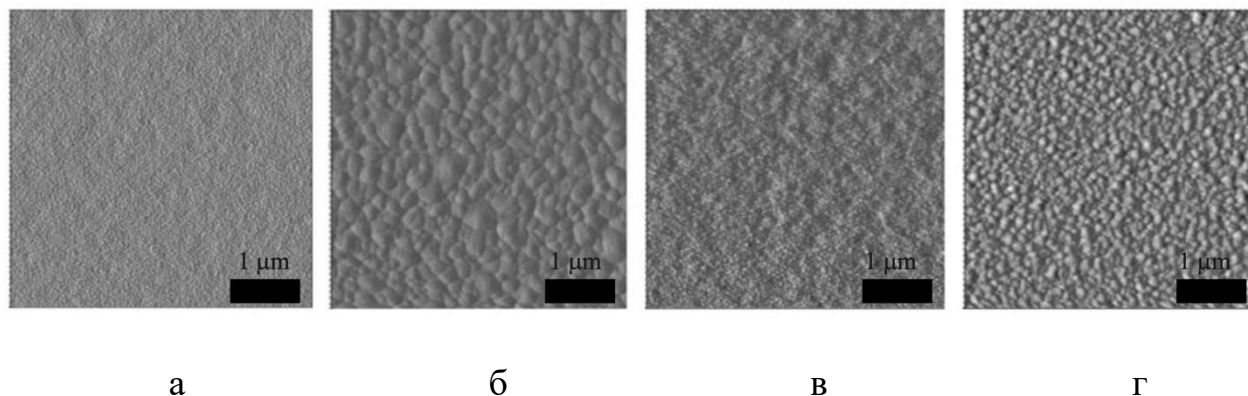


Рис.4.1 - Топологія поверхні зразків з різною технологією нанесення

Проведений аналіз методом атомно-силової мікроскопії, дозволив дослідити топографію поверхні зразків, та визначити існуючі та значні відмінності поверхонь срібних плівок, що були нанесені різними методами(рис4.1.). Плівки, що були отримані методом електронно-променевого напилення(рис 4.1а, б), виглядають більш ущінненими та однорідними на відміну виготовлених методом магнетронного напилення – рис 1в, г.

Таблиця 4.1 - Дослідження пластин з контактами, що сформовані електронно-променевим напилення.

Параметри	Без відпалу	100°C, $10^{-4}$ Па	200°C, $10^{-4}$ Па	100°C, $10^{-6}$ Па	200°C, $10^{-6}$ Па
$\sigma_{rms, \text{нм}}$	2.10	6.20	8.30	10.0	9.20
$\alpha Ag, \text{\AA}$	4.0779	4.0747	4.0757	4.0792	4.0790
$W_{Ti}, \%$	1.24	2.32	2.48	2.03	2.04

Таблиця 4.2. - Дослідження пластин з контактами, що сформовані магнетронним напиленням.

Параметри	Без відпалу	100°C, 10 <sup>-4</sup> Па	200°C, 10 <sup>-4</sup> Па	100°C, 10 <sup>-6</sup> Па	200°C, 10 <sup>-6</sup> Па
$\sigma_{rms, \text{нм}}$	5.90	7.40	9.00	10.5	6.00
$\alpha Ag, \text{\AA}$	4.0836	4.0833	4.0810	4.0835	4.0816
$W_{Ti}, \%$	1.19	1.27	1.73	1.22	1.62

Як видно з отриманих даних у табл.1 та 2, а саме представленні такі результати вимірювань  $\sigma_{rms, \text{нм}}$  – шорсткість поверхні,  $\alpha Ag, \text{\AA}$  - параметр масиву,  $W_{Ti}, \%$  - концентрація титану:

- після відпалу значення шорховатості збільшуються до 10 нм в першому випадку та до 10,5 нм у другому випадку
- структура плівки переживає суттєві зміни через процес утворення зерен у шарі плівки із срібла.

З отриманих результатів, видно, що одразу після проведення процесів електронно-променевого напилення та магнетронного – шорсткість поверхні складає 2,1 нм та 5,9 нм відповідно. Також у випадку виготовлення магнетронним способом напилення спостерігається структурні неоднорідності на поверхні, та утворення оболонки адсорбованих газів, чого не спостерігається у випадку виготовлення електронно-променевим способом так, як сам процес виготовлення відбувається за умов високого вакууму.

У випадку, котрий було отримано МН, та зображено на рис. 1 (г), можна спостерігати наявність наномаштабних зерен (приблизно 100-220 нм), після

відпалу, вони також з'являються, але в цьому випадку їх розмір не перевищує 100 нм(рис 1в). Аналізуючи ці данні, можна зробити висновок, що температура проведення процесу, призводить до структурного перетворення аморфної матриці, з утворення кристалічних зерен. Відпал розпиленних плівок у вакуумі призводить до випаровування адсорбованих газів з їх поверхні, про що свідчить зникнення сферичної оболонки в районі кристалічних утворень та виникнення чітких меж зерен.

Повертаючись до отриманих результатів, що представленні у табл. 4.1. та табл. 4.2. важливо відмітити, у зрівнянні впливу температури та тиску, температура менш критично впливає. А саме зниження тиску, спричиняє зменшення значень  $\sigma_{rms}$  - майже удвічі (приблизно на 50%), що може призводити до модифікації поверхні срібної плівки. Аналізуючи цей фактор, можна підсумувати, що для синтезу тонких сплівок срібла, що мають дрібнозернисту структуру бажано проводити відпал під тиском  $10^{-4}$  Па, а для крупнозернистої структури -  $10^{-6}$  Па

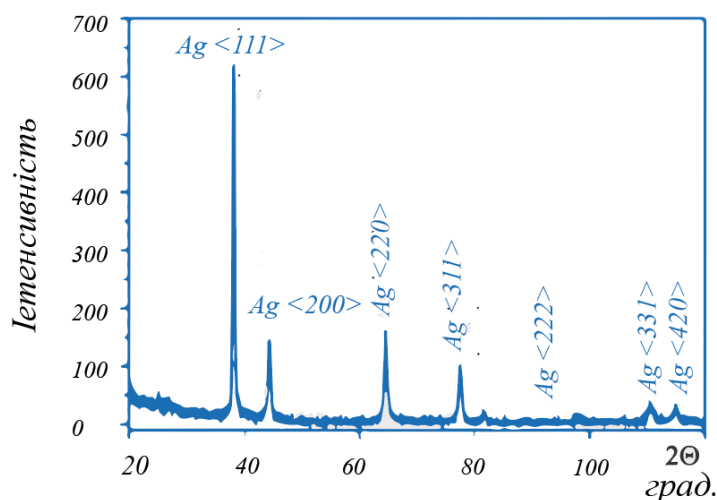


Рисунок 4.2 - Дифракційні картини тонких срібних плівок

На рис. 4.2. Продемонстровано дифракційні картини та 7 піків дифракції Ag, що було нанесено методом магнетрального напылення. [14] у табл.4.1.

Представлено розрахований параметр кристалічної решітки. В даному випадку домішки у кристалічній решітці не спостерігались. На кристалічну структуру зерен вказують піки високої інтенсивності. Найбільшою дифракційною інтенсивністю характеризується плівка Ag  $\langle 111 \rangle$ , саме це є показником наявності кристалічних фаз більше ніж у випарниках.

Наявність самообману між шарами срібла та титану, за умов проведеного відпалу, було продемонстровано за допомогою дифракції рентгенівських променів. Це явище продемонстровано на рис.4.2 зсувом дифракційної плівки та зміною їх інтенсивності, можна зробити висновок, що було утворено твердий розчин титан-срібло. Отже процес самообману атомів походить у тому числі й за допомогою об'ємного механізму, а не тільки - межового механізму зерен.

Була розрахована концентрація Ti у твердому розчині після відпалу, та до його проведення (табл.1). Кількість титану, що була розчинена до відпалу при використанні технології електронно-променевого напилення є більшою, ніж при проведенні магнетронного напилення. Процес відпалу, що проводиться за умов тиску  $10^{-6}$  Па у результаті призводить до майже неістотних змін розташування дифракційних піків та змін інтенсивності, ніж за умов тиску  $10^{-6}$  Па. Температурний режим майже не спричиняє нікого впливу на кількість титану, що розчинений у срібній плівці.

На рис.4.3(а) зображено по шаровий розподіл елементів у структурі кремній-титан-срібло за допомогою методики MSSN. Отримані данні вказують на погіршенні електричні характеристики контактів.

Тому для цього є доцільним створення дифузійного бар'єру між шарами срібла та титану, за допомогою введення шару молібдену (температура плавлення -  $2617^{\circ}\text{C}$ ). Дифузія атомів Ag у шар Mo відбувається тривалістю – 20 хвилин та за температури  $500^{\circ}\text{C}$ , при цьому межа розподілу Mo-Ti є нерухомою (рис 4.3. б).

Аналізуючи отриманні результати, видно, що контакти з шаром Mo є достатньо термостійкими та відсутній вплив Ti на провідність Ag.

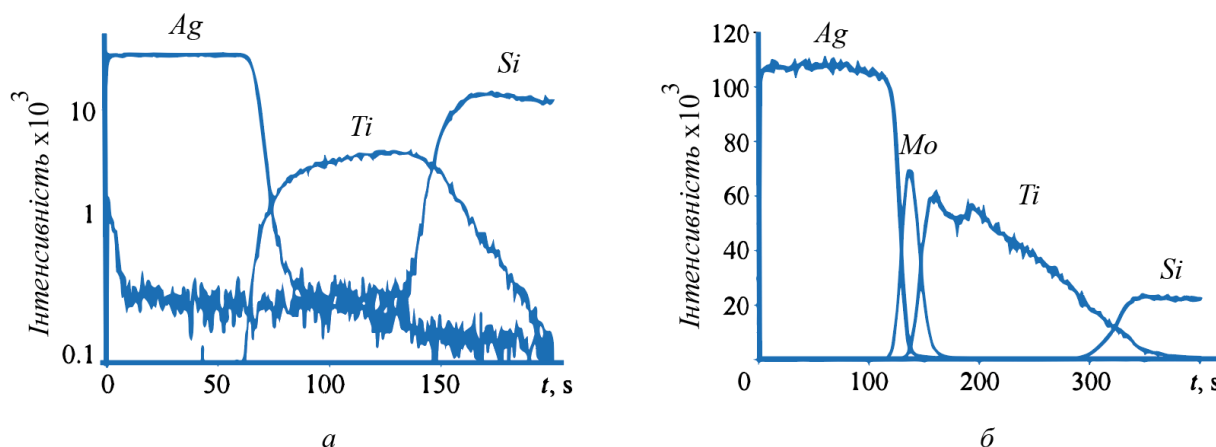


Рисунок 4.3 - Шаровий розподіл елементів у структурах

Дані досліджень електричних характеристик срібних плівок добре узгоджуються із структурним аналізом, зокрема, з даними, отриманими за допомогою атомно-силової мікроскопії, що представлені вище. Наприклад, розпилені срібні плівки, електронно-променевим методом, характеризуються вищим ступенем кристалічності, що призводить до поліпшення їх електричних властивостей.

Впорядкування структури плівки на рівні наномасштабу призводить до зменшення кількості структурних дефектів у ній, а для нанооб'єктів це призводить до виникнення балістичного транспорту, що чітко покращує електричні властивості матеріалу [17, 28].

Також можна спостерігати зв'язок структурних та електричних властивостей отриманих плівок для різних умов відпалу. Наприклад, температура відпалу має значно менший вплив на властивості плівки, ніж тиск у камері (табл. 2). Різниця в поведінці поверхневого опору срібної плівки після відпалу у вакуумі для методів МН та ЕПН обумовлена різницею в розмірах отриманих зерен у плівці.



Таблиця 4.3 - Поверхневий опір плівки срібла після відпалу, для різних технологій вакуумного напилення

		Метод МН	Метод ЕПН
Без відпалу		0.10	1.7
За умов відпалу тривалістю 20хв при 100°C	кисень	0.17	1.1
	вакуум	0.09	2.6
За умов відпалу тривалістю 20хв при 200°C	кисень	0.19	1.5
	вакуум	0.08	4.75

Відомо, що кристаліти малого діаметру характеризуються великим відношенням площі поверхні до об'єму, що свідчить про домінуючий вплив поверхні зерна, а не його обсягу [29]. Оскільки поверхня нанокристаліту містить велику кількість структурних дефектів, то для тонкокристалічної плівки поліпшення електричних властивостей не спостерігається, що має місце для срібних плівок, синтезованих за методикою ЕПН.

Для дослідження впливу наноструктурованих плівок срібла в контактній системі ФЕП на її фотоелектричні властивості було використано кремнієві сонячні елементи з контактами Ti/Ag та Ti/Mo/Ag. У цьому випадку було виявлено, що введення проміжного шару молібдену викликає зменшення поверхневого опору з 0,4 (система Ti/Ag) до 0,1 (система Ti /Mo/Ag) за умови однакових режимів синтезу плівок титану та срібла, що узгоджується з даними, представленими вище для пошарового хімічного аналізу контактних систем (рис. 4.3).

Дослідження фотоелектричних властивостей отриманих ФЕП показало, що зменшення опору контактної системи, а отже, і послідовного опору елемента,

призводить до збільшення його струму короткого замикання та коефіцієнта заповнення.

Зменшення поверхневого опору срібної плівки в контактній системі Ti/Ag від значення 0,4 до 0,1 призводить до збільшення струму короткого замикання ФЕП з 8 до 12 мА та коефіцієнта заповнення з 0,49 до 0,55. У цьому випадку фотоелектрична потужність дорівнює 300 та 304 мВ відповідно. Також було встановлено, що введення проміжного шару молібдену збільшує щільність струму короткого замикання сонячної батареї з 13,5 (система Ti/Ag) до 14,8 мА/см<sup>2</sup> (система Ti/Mo/Ag).

. Отже, контактна система Ti / Mo /Ag з наноструктурованими плівками срібла може ефективно замінити контактну систему Ti / Pd / Au як з точки зору вартості, так і ефективності сонячних елементів.

### **Висновки:**

У цьому розділі було проаналізовано систему контактів, які використовуються для ФЕП, було обрано оптимізований варіант контактів та описано розроблений технологічний маршрут виготовлення контактної системи Ti/Mo/Ag. Описано синтез багатошарових контактних систем Ti/Ag та Ti/Mo/Ag з наноструктурованими плівками срібла та процес і результати дослідження процесів утворення зерна та масообміну в них. Крім того, були визначені технологічні умови синтезу фронтальних контактів ФЕП, які характеризуються зниженим поверхневим опором контактів та підвищеним струмом короткого замикання.

## 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕП

### 5.1. Дослідження фотовольтаїчних характеристик ФЕП

На тестері ФЕП СТ-801 було проведено вимір параметрів ФЕП, що досліджувалися. Вимірювання ВАХ зазвичай проводять опроміненням фотоелектричного перетворювача світлом з розподілом спектру АМ1.5, з щільністю потоку опромінення  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , при температурі оточуючого середовища  $25^\circ\text{C}$  (стандартні умови вимірювань). При цьому змінюють опір навантаження від нуля до нескінченності.

Вимір ВАХ, дозволило отримати значення параметрів:

- ККД сонячного елемента;
- $U_{OC}$  - напругу холостого ходу;
- FF – коефіцієнт заповнення;
- $I_{SC}$  – струм короткого замикання;
- $R_{se}$  – послідовний опір.
- $R_{sh}$  – шунтуючий опір

На рисунках 5.3 - 5.10 зображено типові характеристики зразків ФЕП, що було виготовлено. Параметри елементів було розраховано, та внесено у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 - Параметри виготовлених фотоелектричних елементів

Зразок	$I_{sc}$ , A	$U_{oc}$ , V	Eff, %	FF, %	MPP, W	$U_{mpp}$ , V	$I_{mpp}$ , A	$R_{ser}$ , Ohm	$R_{sh}$ , Ohm
02-01	1,15	0,620	16,81	77,48	0,597	0,586	1,02	0,056	17,541
02-03	1,12	0,615	16,66	77,07	0,609	0,57	1,07	0,0057	154,962
03-04	1,26	0,625	17,86	79,04	0,649	0,613	1,06	0,0055	40,613
03-08	1,22	0,624	17,63	78,40	0,655	0,607	1,08	0,0051	179,221
04-12	1,26	0,621	18,40	79,20	0,693	0,614	1,13	0,0036	141,774
04-13	1,28	0,629	18,38	79,84	0,701	0,615	1,14	0,0033	981,100
12-03	1,32	0,625	19,66	80,07	0,698	0,597	1,17	0,0057	187,962
12-07	1,41	0,647	19,7	80,27	0,862	0,639	1,35	0,0054	84,537

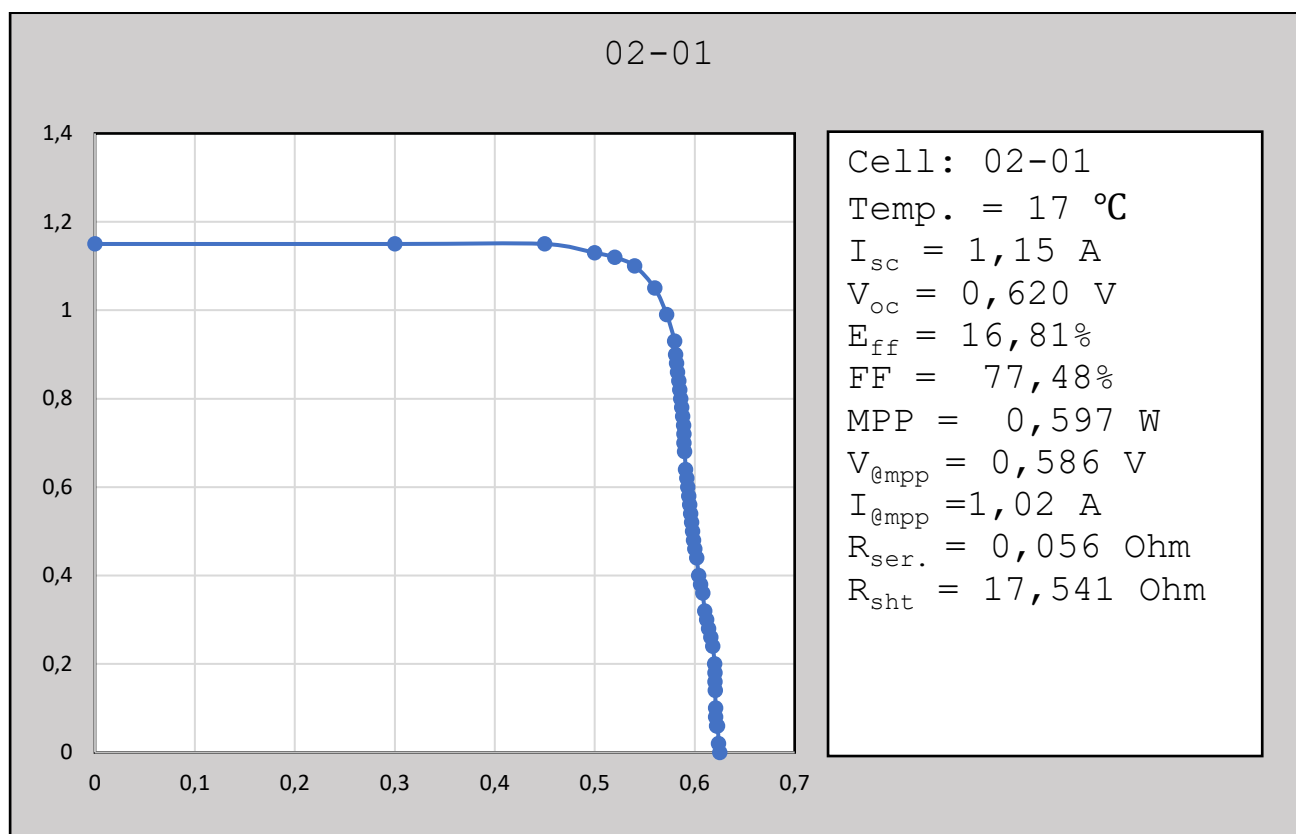


Рисунок 5.1 - Параметри та вольт-амперна характеристика 02-01

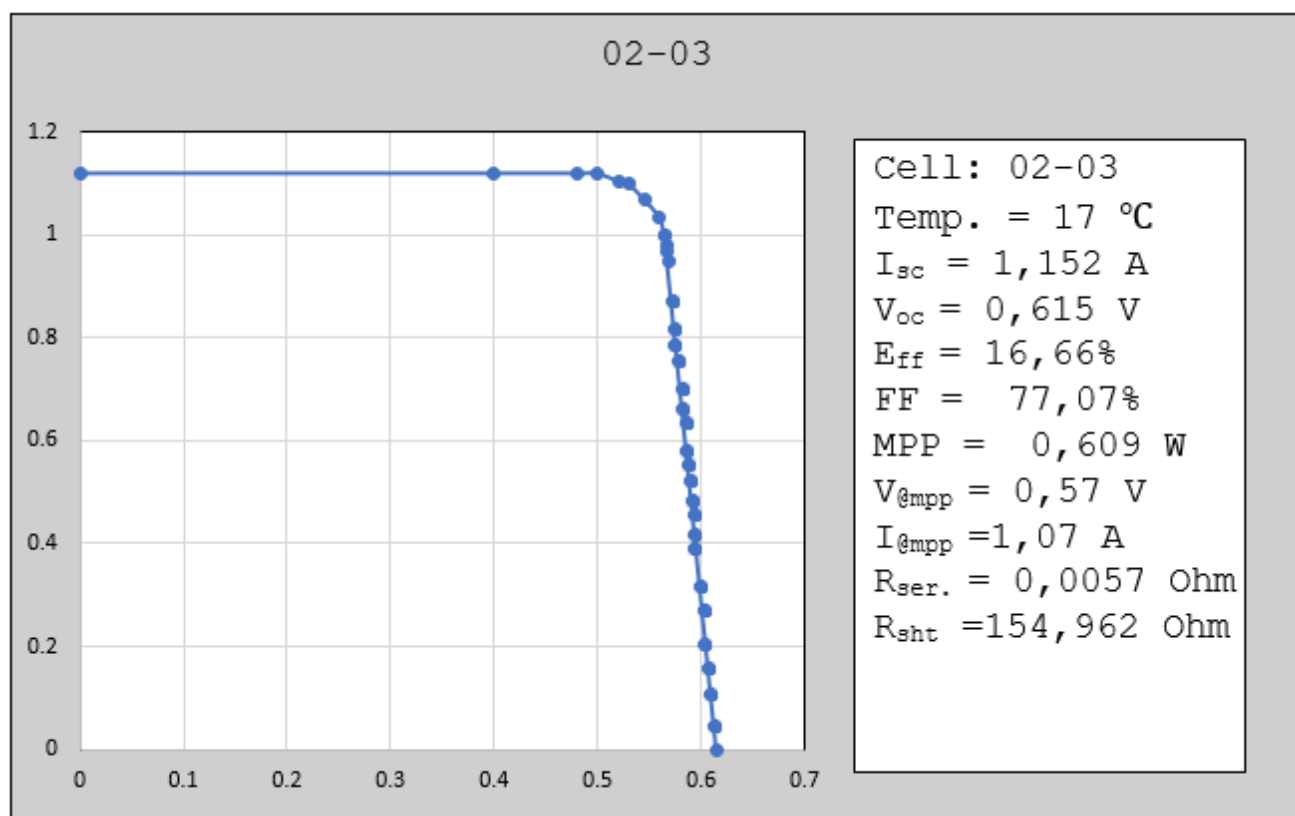


Рисунок 5.2 - Параметри та вольт-амперна характеристика 02-03

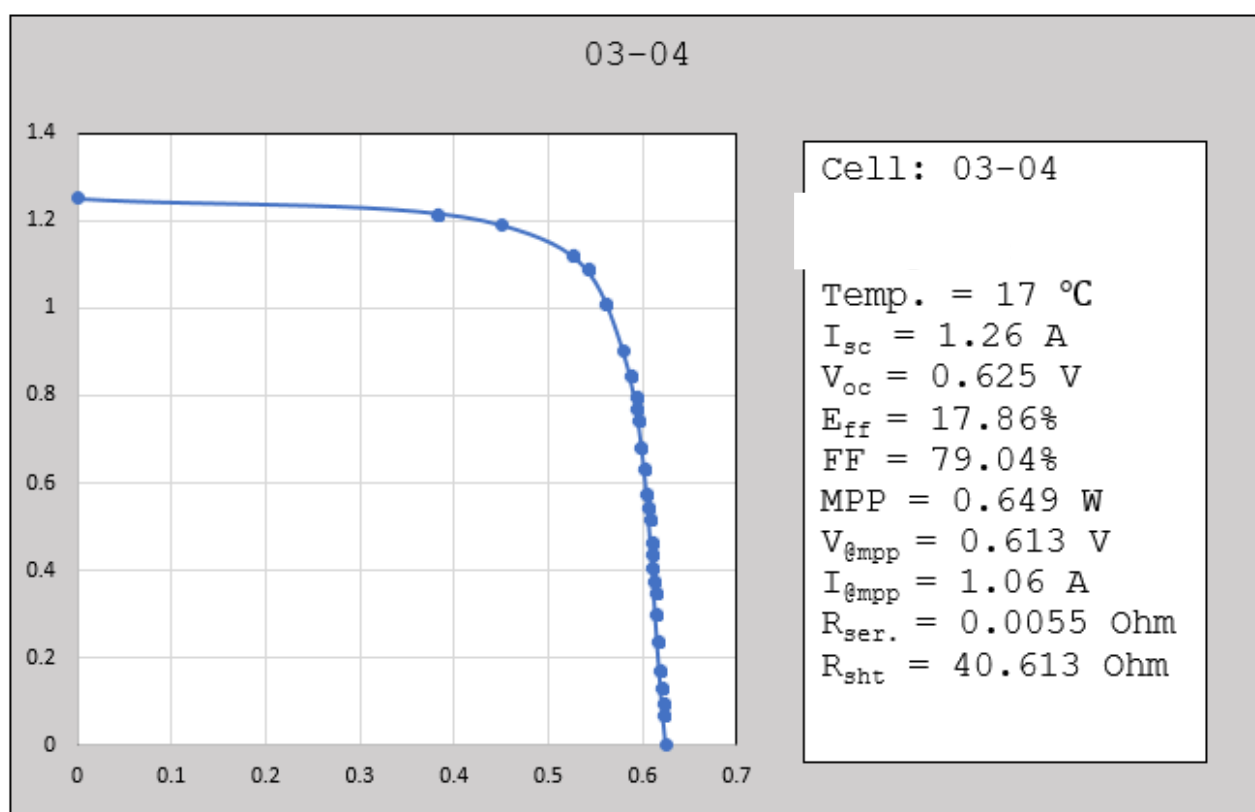


Рисунок 5.3. - Параметри та вольт-амперна характеристика 03-04

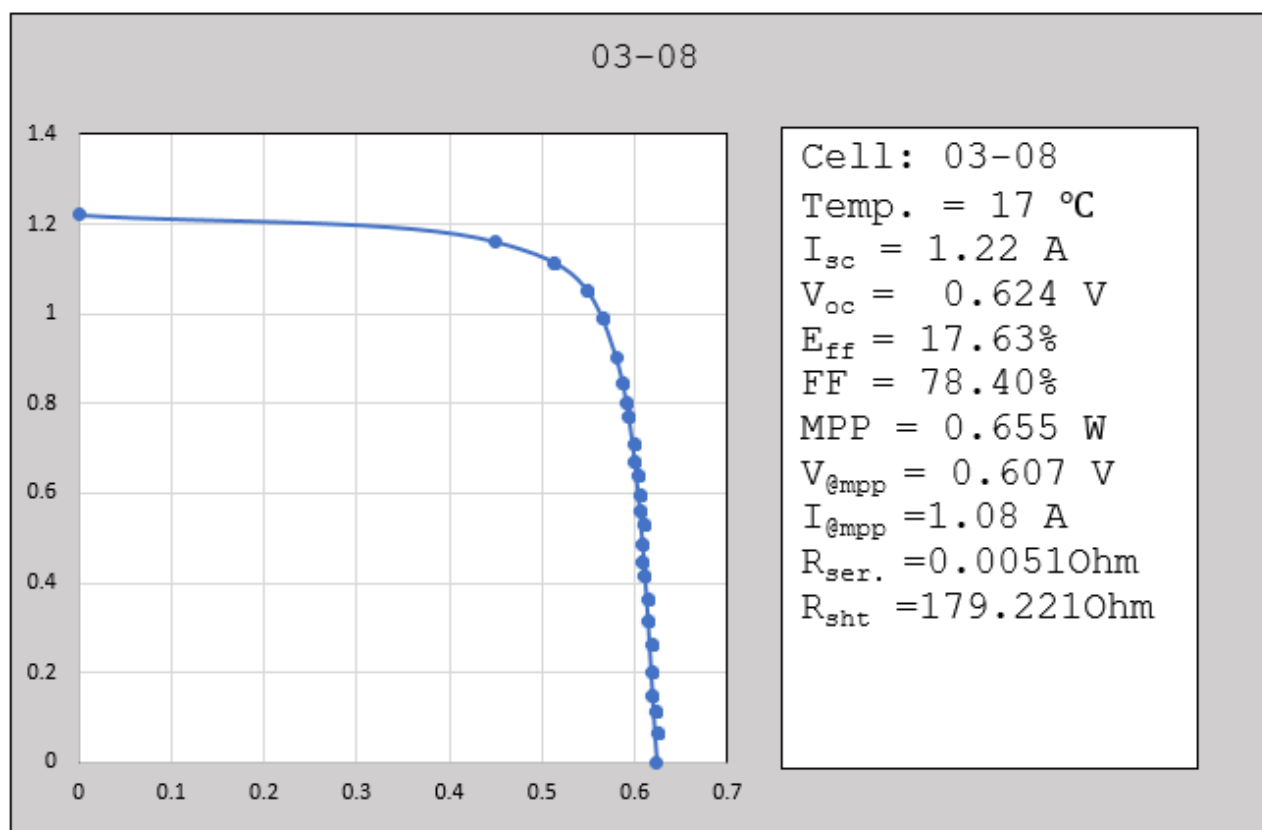


Рисунок 5.4. - Параметри та вольт-амперна характеристика 03-08

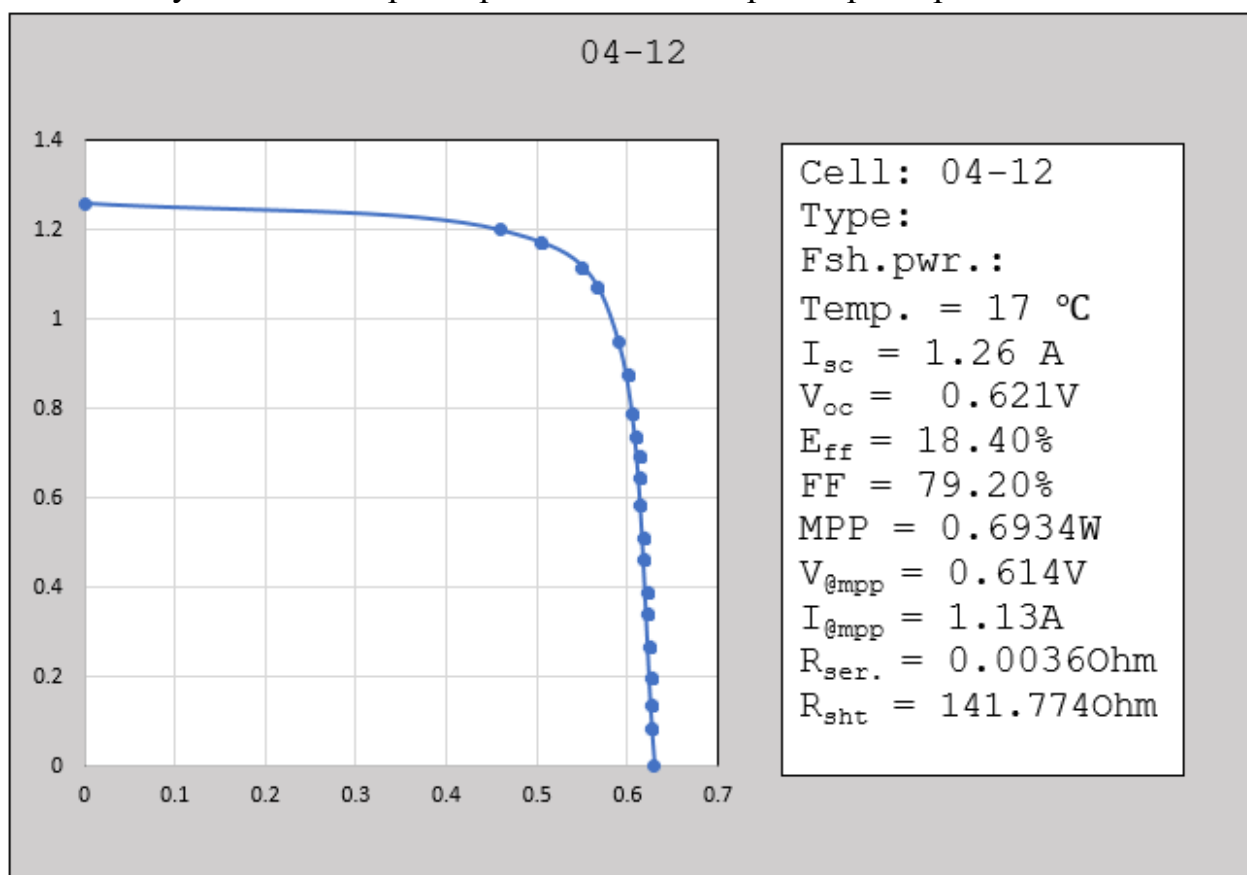


Рисунок 5.5. - Параметри та вольт-амперна характеристика 04-12

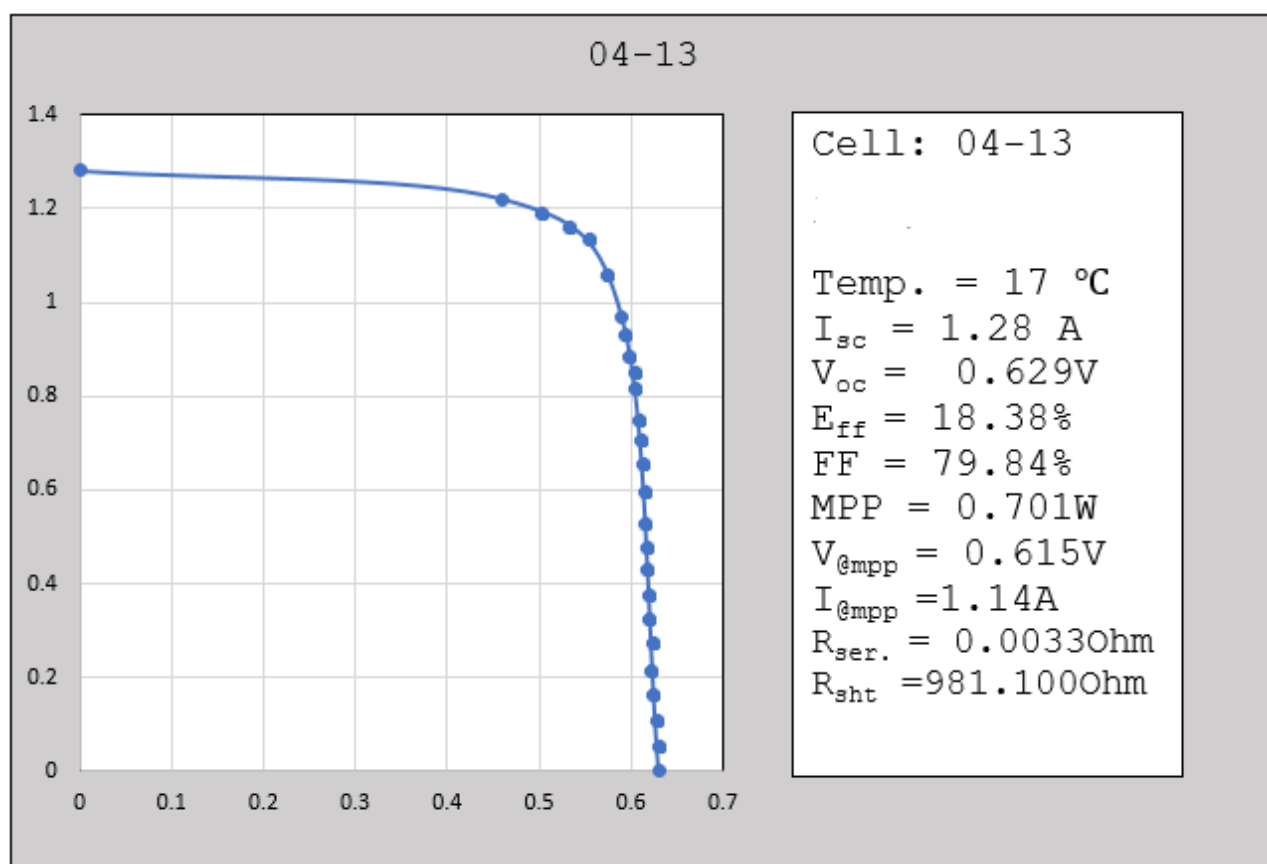


Рисунок 5.6. – Параметри та вольт-амперна характеристика 04-13

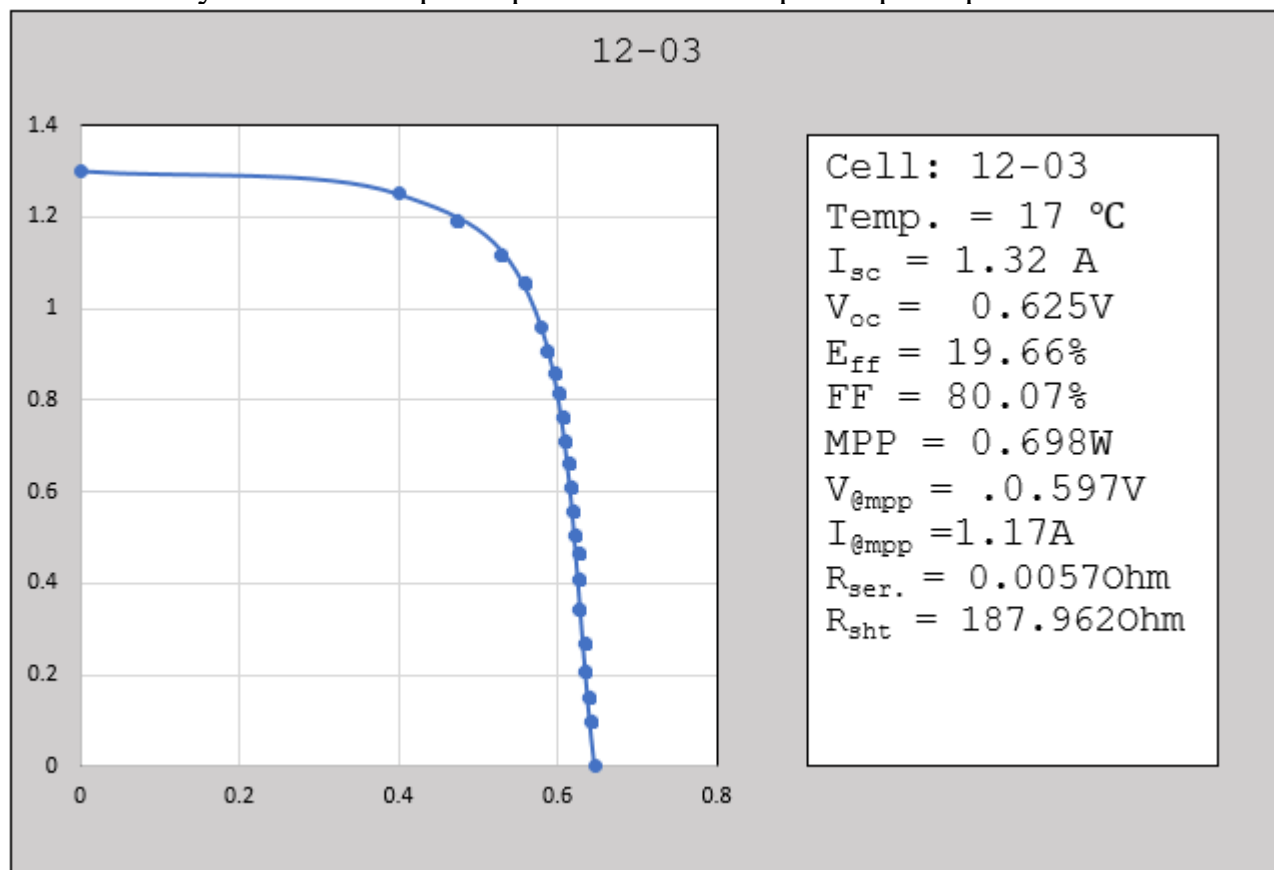


Рисунок 5.7. - Параметри та вольт-амперна характеристика 12-03

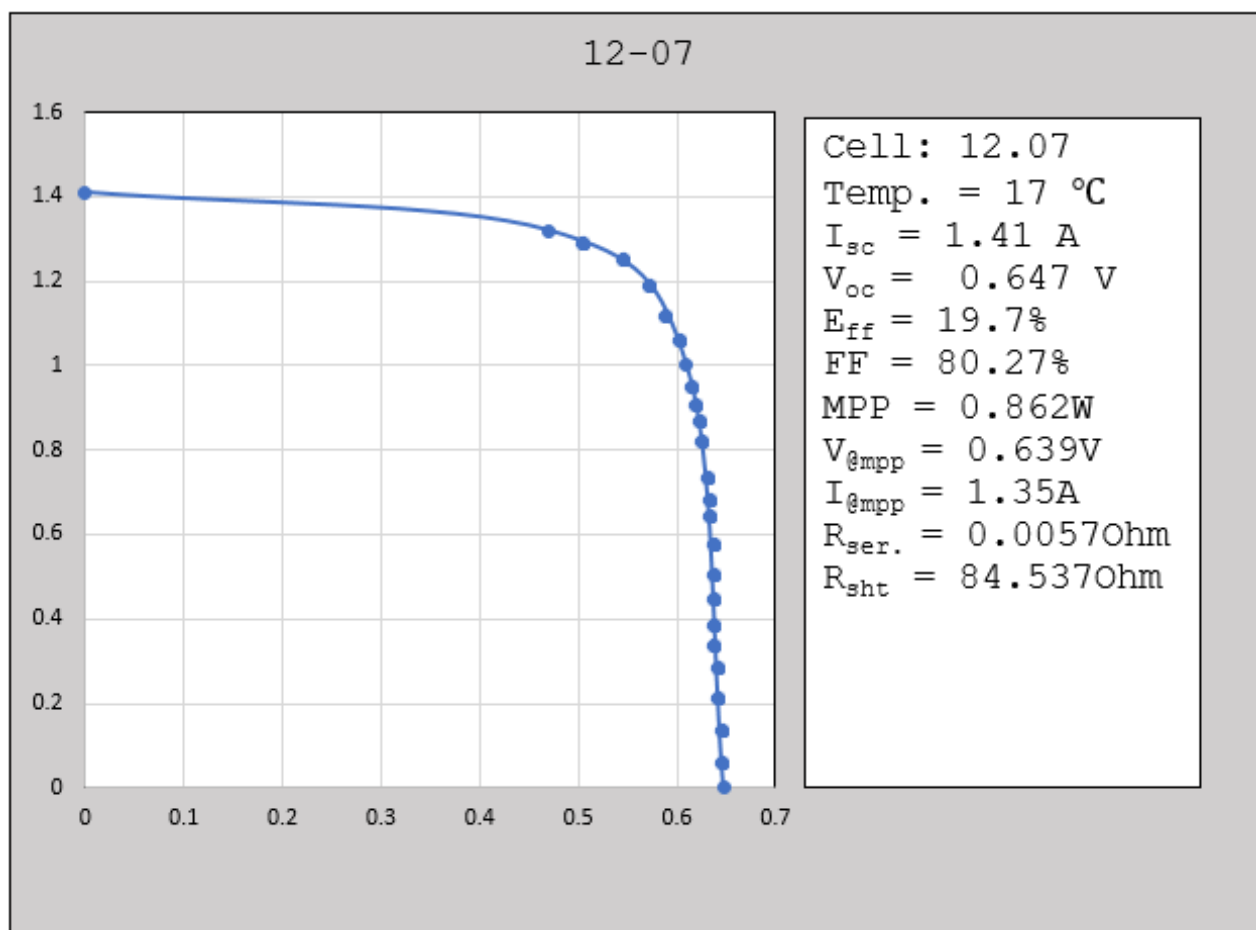


Рисунок 5.8. - Параметри та вольт-амперна характеристика 12-07

Зразок 12-07 –має найкращі параметри%

ККД= 19.7%,

FF=80,27%,

$I_{sc} = 1.41$  A,

$V_{oc} = 0.647$  V.

### Висновки:

У цьому розділі представлені ВАХ та параметри фотоелектричних перетворювачів, що досліджувалися задовольняють вимогу ФЕП космічного призначення для супутника PoliTAN -3.



## 6 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 6.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 6.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання кремнієвих фотоперетворювачів радіаційної стійкості з системою контактів Ti/Mo/Ag та підвищеним ККД	Космічна промисловість	Вартість ФЕП
		Простота технології виготовлення
	Дослідницька робота у вищих навчальних закладах	Відносний термін експлуатації
		Ефективність перетворення

Таблиця 6.2. - Визначення сильних слабких та нейтральних характеристик ідей проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W(слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S(сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1.	Економічні	148,51 у.о.	400,00 у.о.		+	
2.	Призначення	Живлення космічних апаратів	Живлення космічних апаратів		+	
3.	Надійності	Довговічність – більше 5 років	Не вказана		+	
4.	Технологічні	ФЕП	ФЕП			
5.	Ергономічні	-	-			
6.	Органолептичні	-	-			
7.	Естетичні	-	-			
8.	Транспортальності	Поставляється у вигляді СБ	Поставляється у вигляді СБ			
9.	Екологічності	Екологічно	Екологічно		+	
10.	Безпеки	Умовно безпечно	Умовно безпечно		+	

Конкурент - Silicon solar space cell S 32 «AZUR SPACE Solar Power GmbH»

## 6.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 6.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

п/п	Ідея проекту		Наявність технологій	Доступність технологій
	Виготовлення кремнієвих фотоперетворювачів радіаційної стійкості з системою контактів Ti/Mo/Ag та підвищеним ККД	Фотоелементи певної форми з монокристалічного кремнію з контактами Ti/Mo/Ag	наявна	доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Фотоелектричний перетворювач певної форми з монокристалічного кремнію з контактами				

Таблиця 6.4 - Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
	Кількість головних гравців, од	1
	Загальний обсяг продаж, ум.од/рік	30 000 у.о./рік
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідність сертифікації RoHS, сертифікації електронних компонентів
	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	160%

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 6.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів
	Необхідність ефективних фотоперетворювачів для космічних апаратів, відносної дешевизни	Некомерційні проекти	-	Товар повинен мати високу чутливість, довговічність та ефективне перетворення енергії, а також не високу ціну.

Таблиця 6.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Необхідні інженери з певною кваліфікацією та напрацьованими навичками	Підбір персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях.
2.	Конкуренція	Демпінг цін іншими виробниками	Створення нових версій продукту з додатковими функціями для охоплення більшої аудиторії або покращення характеристик існуючого
3	Необхідність сертифікації	Проходження спеціального сертифікації	Необхідні спеціалісти з сертифікації та забезпечення нормативності виготовленої продукції

Таблиця 6.7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Спонукає до зменшення собівартості готового виробу, покращення характеристик та підвищення ефективності	Виготовлення продукту шляхом залучення нових виробничих потужностей та технологічних процесів.
2.	Новітність	Розвиток даної галузі набирає обертів, тому з оптимізацією та досягненням необхідних характеристик, буде збільшуватись к-ть споживачів.	Реклама та робота зі спорідненими організаціями для залучення додаткових коштів у компанію.

Таблиця 6.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: - поліполія	На ринку	Покращення ефективності роботи та якості продукту. Оптимізація технологій виготовлення.
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Немає територіального обмеження місцезнаходження фірм	Створення веб-сторінки для компанії, з використанням різних мов для іноземних користувачів, якісна обробка заявок та обробки замовлень.
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Боротьба між виробниками в одній і тій же галузі – економічна. Реалізація схожих товарів за характеристиками та сфері експлуатації. Різниця полягає у ефективності, технології виготовлення та якості, тощо.	Необхідно відстежувати конкурентів. Та залучати інвестиції для розширення можливостей.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між аналогічними товарами.	Оптимізація та підвищення якості товару.
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Нехтування ціною, підвищуючи якість	Ціна продажу не нижче середньої ціни на ринку.
6. За інтенсивністю - немарочна	Торгова марка відносно не значна	Взаємодія з сильними гравцями на ринку.

Таблиця 6.10 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	AZUR SPACE Solar Power GmbH	Відсутні	Наявні дистриб'ютори	Потребують якісний продукт з тривалим терміном експлуатації	Товари виготовленні з інших матеріалів.
Висновки	Інтенсивність досить висока, конкуренти вже давно на ринку	Відсутні	Постачальник та дистриб'ютори встановлюють додаткові умови роботи на ринку	Задоволення зазначених потреб	Простіші рішення для малих проектів можуть обмежувати роботу на ринку

Для створення конкурентоспроможності на ринку, до розробки товару необхідно залучити кваліфікованих науковців та інженерів для покращення характеристик поточного продукту та розробки нових. Важливим є залучення маркетологів для створення реклами продукту та просування його на ринок з метою заміщення долі конкурентів.

Таблиця 6.11 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ступінь чутливості.	Один з конкурентів надає покращення однієї з зазначених характеристик свого продукту, проте не звертає уваги на іншу
2.	Якість розробки з точки зору показників довговічності застосування	Продукт повинен мати достатньо високий рівень продуктивності в порівнянні з конкурентами та ефективність перетворення.
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та шляху виробництва потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару має бути раціональною та конкурентоздатною.

Таблиця 6.12 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з "3М"						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь задоволення потреб користувача.	17						+	
2.	Якість розробки з точки зору показників надійності.	15					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	15					+		
4.	Економічний (ціна товару)	19						+	



Таблиця 6.13 - SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: ґрунтовний підхід до визначення рівня надійності схеми, адаптивність до різних вимог щодо надійності схеми	Слабкими сторонами є – специфічність продукції, що виробляється, необхідність наукових ресурсів,
Можливості: знижувати витрати на виробництво продукції, покращувати якість продукту; формування попиту у користувачів за рахунок рекламної діяльності.	Загрози: підбір персоналу, який має володіти певним набором знань

Таблиця 6.14 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Дослідження поведінки споживачів, пошук наукових ресурсів, розробка програмного забезпечення, створення реклами, взаємодія з органами інтернаціонального менеджменту та ринку збуту СБ для КА	60%	2 роки
2.	Дослідження поведінки споживачів, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, створення лабораторного обладнання та його закупівля, тестування.	70%	3,5 років

Обрано альтернативу № 1.

### 6.3. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 6.15 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах Цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Промислові об'єкти , індивідуальні користувачі, некомерційні проекти	Готові	Середній	Висока	Середня
2.	Приватні особи	Готові	Середній	Висока	Висока
Обрано цільову групу №1					

Таблиця 6.16 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	№1	Інноваційність технології та широке поширення за допомогою основних гравців. Надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів	Формування попиту у користувачів за рахунок спеціальної вузько-запатентованої функціональності та високої якості товару	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 6.17 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Ні	Удосконалення уже існуючих товарів

Таблиця 6.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Високий коефіцієнт корисної дії СЕ, оптимальне співвідношення ціна-якість, надійність товару та ефективність роботи.	Диференціація	Відповідність ціни та якості.	Оптимальне співвідношення ціна/якість, новаторство.

### 6.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 6.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Ефективність перетворення сонячної енергії, високий ККД, низька ціна, проста технологія виготовлення, термін експлуатації.	Високий показник ККД – 19,7%, відпрацьована технологія, оптимізація технологій виготовлення, що призведе до ефективної роботи та довгого терміну експлуатації виготовлення, не висока ціна	Оптимальне співвідношення ціни, якості та ефективності перетворення сонячної енергії протягом відносно тривалого терміну.

Таблиця 6.19 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	300-400 у.о.	350-1000 у.о.	>100000 у.о. і вище	200-1000 у.о.

Таблиця 6.20 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення у розробника або на сайті компанії.	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування.	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію покупцям або через посередників.

Таблиця 6.22 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Застосування товару для перетворення енергії у космосі	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Зниження ціни не за рахунок пониження якості, а за рахунок оптимізації технології та конструкції, а також ефективного перетворення.	Поширення інформації щодо появи іновативного продукту з покращеними характеристиками.	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують

## Висновки:

На сьогоднішній день галузь космічної промисловості розвивається швидко через популяризацію науки у світі. Тому комерціалізація вищезазначеного стартап-проекту є актуальною. Розробка і впровадження запропонованого сонячного елемента з підвищеним ККД та системою контактів Ti/Mo/Ag може створити конкуренцію існуючим компаніям. Аналогічна пропозиція є життєздатною на ринку, через широкий спектр потенційних клієнтів: Індивідуальні замовники, некомерційні проекти та інші.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертації було проаналізовано вплив конструкції, фактори та параметри, а також технологію виготовлення які мають вплив на ефективну роботу фотоперетворювача та якість перетворення сонячної енергії

Було проаналізовано, що контактна система, має значний вплив на ефективну роботу ФЕП, та проаналізовано можливі контактні системи для використання при виготовленні ФЕП. Створенню технологічний маршрут напилення с-ми контактів Ti / Mo / Ag та дослідженню виготовленні системи двома доступними технологіями вакуумного напилення.

Було визначено технологічні умови синтезу фронтальних контактів ФЕП, які характеризуються зниженим поверхневим опором контактів та підвищеним струмом короткого замикання. Тому можна стверджувати, контактна система Ti/Mo/Ag з наноструктурованими плівками срібла може ефективно замінити контактну систему Ti/Pd/Au, що в свою чергу не призведе до зменшення ефективності перетворення енергії але допоможе зменшити вартість СЕ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Г.П. Яровой Кремниевые фотопреобразователи для космической и авиационной отрасли, Г.П. Яровой, Н.В. Латухина, А.С. Рогожин<sup>1</sup>, А.С. Гуртов, С.В. Ивков, С.И. Миненко - 2012
2. Н.В. Белан. Бортовые энергосистемы космических аппаратов на основе солнечных и химических батарей: учебн. пос. / Н.В. Белан, Федоровский К.В. Безручко, В.Б. Елисеев, В.В. Ковалевский, В.А. Летин, В.Н. Постановов, А.Н. – Харьковский авиационный институт - 1992.- 191 с.
3. Крейнин, Л. Б. Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации / Л. Б. Крейнин, Г.М. Григорьева – М.: ВИНТИ, 1979. – 128 с.
4. Tribble A. C. Contamination control engineering design guidelines for aerospace community / NASA Contractor Report. — 1996. — N 4740. — 126 p.
5. Dever J. A. Contamination of space environmental effects on solar cells and thermal control surfaces / Dever J. A., Bruckner E. J., Scheiman D. A. // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — 32, N 5. — P. 832—838.
6. Leet S. J. Thermo-optical property degradation of irradiated spacecraft surfaces/ Leet S. J., Fogdal L. B., Wilkinson M. C. // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — 32, N 5. — P. 832—838.
7. А.Фаренбрух. Солнечные элементы. Теория и эксперимент/ А.Фаренбрух, Р. Бьюб. пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280с.
8. Андреев, В.М. Гетероструктурные солнечные элементы/ Андреев, В.М.// Физика и техники полупроводников. -1999. – Т. 33, вып. 9 – С. 1035 – 1038. 15
9. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Раушенбах Г. Пер с англ. – М.: Энергоатомиздат, -1983 – 360с.
10. Rentechno. Режим доступу до ресурсу:  
<http://retechno.ua/ua/articles/si-solar-cell-technology.html>

11. Conebeer, G. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells. / G. Conebeer, M. Green, R. Corkish et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 511-512. P. 654-662.
12. КПД солнечных батарей достиг рекордного значения. Режим доступа до ресурсу:  
<http://lenta.ru/news/2007/07/25/solar/14.03.2008>
13. Ritter E.S. Comparison of silicon solar cell for space and terrestrial use / E.S. Ritter, R.A. Arndt // J. Appl. Phys. – 1976. Vol. 47. – P.2999 – 3004.
14. Ю. Якименко. Звіт про наукову-дослідну роботу.Фізико-технічні основи конструктивно-технологічних рішень сонячних елементів рідеоземельних елементів та гетероструктур / Ю. Якименко УДК 621.383.7:629.7.064 КВНТД 1.2 12.11.13
15. Глиберман А.Я. Кремниевые солнечные батареи. / Зайцева А.К., Глиберман А.Я. М – Л., Госэнергоиздат, 1961. - 72 с.
16. Забродский В.В. Исследование стабильности кремниевых фотодиодов в вакуумном ультрафиолете / Забродский В.В., Аруев П.Н., Белик В.П. // Физика и техника полупроводников, 2013 - Т.47. Вып. 2. - с.178-181.
17. Полупроводниковые фотоприемники / Под ред. В.И.Стафеева. М.: Радио и связь, 1984. - 216 с.
18. Павлык Б.В. Совершенство поверхности кристаллов p-Si и радиационно стимулированные изменения характеристик поверхностно-барьерных структур Bi-Si-Al / Павлык Б.В., Слободзян Д.П., Грыпа А.С.// Физика и техника полупроводников. 2012. - Т.46. Вып. 8. с.1017-1021:
19. Гаврушко В.В. Кремниевые фотоприемники с высокой чувствительностью к УФ излучению / Гаврушко В.В., Ионов А.С., Ласткин В.А. // Датчики и системы. 2009. - №6 (121). с.49-51.
20. Алферов, Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алфёров, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, No8. – С. 937-948.



21. Андреев, В.М. Гетероструктурные солнечные элементы / В.М. Андреев // Физика и техники полупроводников, 1999. – Т. 33, вып. 9 – С. 1035 – 1038.
22. Орбіти їх склад. Режим доступу до ресурсу:  
  
<http://en.wikipedia.org/>
23. E.F.Chor. Electrical characterization, metallurgical investigation, and thermal stability studies of (Pd, Ti, Au)-based ohmic contacts E.F.Chor, D.Zhang, H.Gong, W.K. Chong, S.Y.Ong // J. Appl. Phys. – 2000. - 87, No. 5, 2437 ]
24. A.E.Belyaev. Temperature + dependence of contact resistance of Au–Ti–Pd<sub>2</sub>Si–n –Si ohmic contacts, ”/ A.E.Belyaev, N.S.Boltovets, R.V.Konakova, Ya.Ya.Kudryk, A.V.Sachenko, V.N.Sheremet // *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron*, 2010. - , No. 4, 436 (2010),
25. H.Ezawa. Alloying behaviour of electroplated Ag film with its underlying Pd Ti film stack for low resistivity interconnect metallization/ H.Ezawa, M.Miyata, K.Tatsumi // J. Alloys Compd. 2014. - 587, 487, DOI:
26. Martin A.Green. A requirements for silicon wafer-based solar cells / Martin A.Green // *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 19, No. 8,
27. Y. I. Yakymenko, Nanocrystalline silicon multilayer structures for optoelectronics/ V. M. Koval, O. V. Bogdan, Y. I. Yakymenko // *Proc. of 2nd Int. Conf. on Nanotechnologies and Biomedical Engineering*, 2013. - ICNBME-, 18–20 Apr. c
28. Q.Che. A new environmental friendly silver front contact paste for crystalline silicon solar cells/ Q.Che, H. Yang, L. Lu, Y. Wang // *J. Alloys Compd.* - 2013, DOI: [2012.09.080](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.080).
29. V.F.Gremenok. *Solar Cells Based on Semiconducting Materials*/ V.F.Gremenok, M.S.Tivanov, V.B.Zalesskiy BGU, Minsk, - 2007
30. R.A.Andriyevskiy. *Nanostructured Materials*/ R.A.Andriyevskiy, A.V.Ragulya Akademiya. Moscow, - 2005)

31. V.P.Dragunov. Foundations of Nanoelectronics:Textbook /  
V.P.Dragunov,I.G.Neizvestniy,V.A.Gridchin, Moscow, 2006 -125с.
32. S. A. Voronov. Material Physics, Part 1/ S. A. Voronov, L. P. Pereverzeva, Yu.  
M. Poplavko K.: NTUU KPI, 2004-84p.